

Report, Published Version

**Westendarp, Andreas; Reschke, Thorsten**  
**Chlorideindringwiderstand von Beton. FuE-**  
**Abschlussbericht A39510310231**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105083>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

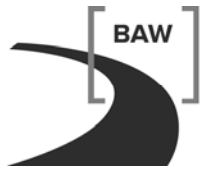
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): Chlorideindringwiderstand von Beton. FuE-Abschlussbericht A39510310231. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau.

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.

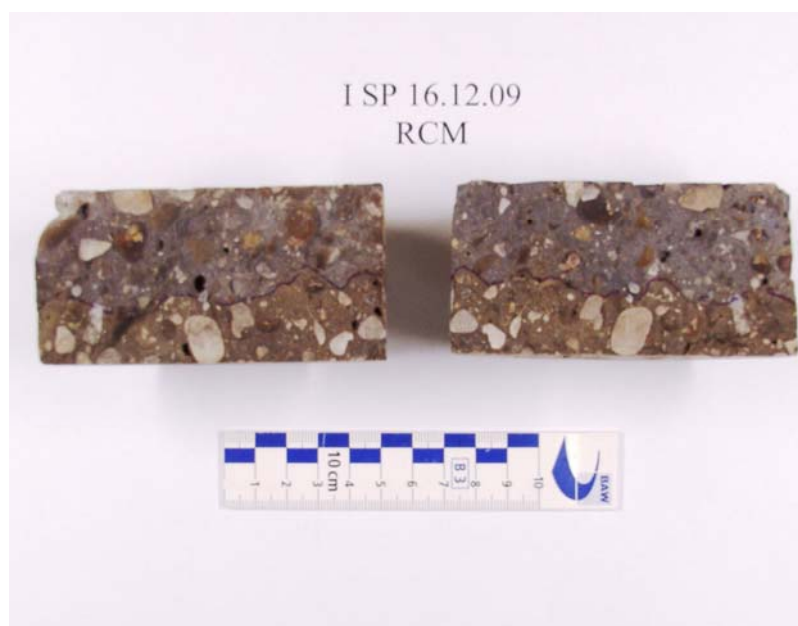
Verwertungsrechte: Alle Rechte vorbehalten



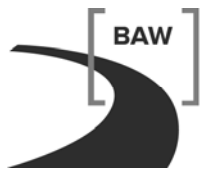
**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

## **FuE Chlorideindringwiderstand von Beton**

**A39510310231**







**Bundesanstalt für Wasserbau**  
Kompetenz für die Wasserstraßen

## **FuE Chlorideindringwiderstand von Beton**

Auftraggeber: BAW

Auftrag vom: 05.04.2006

Auftrags-Nr.: BAW-Nr. A39510310231

Aufgestellt von:	Abteilung:	Bautechnik
	Referat:	Baustoffe B3
	Bearbeiter:	Dr. Reschke

Karlsruhe, 19.03.2012

Das Gutachten darf nur ungekürzt vervielfältigt werden. Die Vervielfältigung und eine Veröffentlichung bedürfen der schriftlichen Genehmigung der BAW.



## Zusammenfassung

Das Ziel des FuE-Vorhabens bestand in der Erarbeitung notwendiger Grundlagen für verschiedene Erweiterungen und Anpassungen des BAW-Merkblatts „Chlorideindringwiderstand von Beton“ sowie entsprechender Regelungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Betons bei Chloridangriff. Dafür wurden sowohl Laboruntersuchungen durchgeführt, als auch - unter Einbeziehung bereits gesammelter Erfahrungen sowie der Laborprüfergebnisse - die numerischen Berechnungsgrundlagen angepasst.

Im Rahmen der **Laboruntersuchungen** erfolgte eine Vergleichsuntersuchung zwischen dem im BAW-Merkblatt „Chlorideindringen“ beschriebenen Schnellmigrationsversuch RCM und einem Chloriddiffusionsversuch. Es bestätigte sich nicht nur eine bessere Handhabbarkeit des Migrationsverfahrens, sondern es zeigte sich auch, dass eine Differenzierung des Chlorideindringwiderstands von Betonen und Instandsetzungsmörteln mit diesem Verfahren sicherer möglich ist. Zudem ist eine Umwertung der Prüfergebnisse im Hinblick auf einheitliche Grenzwerte unpraktikabel. Das Migrationsverfahren wird daher als Referenzprüfung beibehalten, ein zusätzliches Diffusionsverfahren nicht in das Merkblatt aufgenommen.

Die **numerischen Berechnungen** ergaben, dass die Bindemittelart den größten Einfluss auf den Chlorideindringwiderstand besitzt. Während reiner Portlandzement (CEM I) in der Expositionsklasse XS3 bei einer Betondeckung  $c_{\min}$  von 50 mm allenfalls für Nutzungsdauern bis 20 Jahre bei einer Zuverlässigkeit  $\beta=0$  geeignet ist, können mit der Kombination von Hochofenzement und Flugasche (CEM III/A + FA) i.d.R. deutlich höhere Chlorideindringwiderstände erreicht werden. In Verbindung mit einer geringfügigen Erhöhung der Betondeckung um 10 mm könnten mit solchen Bindemittel-Flugasche-Kombinationen Lebensdauern von 100 Jahren mit der für den Verkehrswasserbau üblicherweise anzustrebenden Zuverlässigkeit von  $\beta=1,5$  realisiert werden. Die Aussagekraft der numerischen Berechnungen wurde durch Vergleiche mit Bauwerksmessungen validiert.

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse flossen in die aktuelle Überarbeitung der ZTV-W LB 215 ein. Es wurden allerdings nur entsprechende Anpassungen der deskriptiven Anforderungen an die Betonzusammensetzung (Zementarten, Flugascheanteile) gemäß den vorgenannten Erkenntnissen vorgenommen. Auf eine Erhöhung der Betondeckung wurde vorerst verzichtet, da diese Maßnahme grundsätzlich zu Nachteilen im Hinblick auf die Bildung von Rissen führen kann. Da die vorgenannten Maßnahmen nur für Nutzungsdauern bis 50 Jahre gelten, ist bei höheren Nutzungsdauern für die Expositionsklassen XS2 und XS3 eine Dauerhaftigkeitsbemessung durchzuführen.

Alle weiterführenden Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bemessung des Chlorideindringwiderstands wurden zum Jahresende 2011 als wichtiger Baustein in das FuE-Vorhaben „Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken“ überführt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen weitergehende Bemessungskonzepte erarbeitet werden.



## Inhaltsverzeichnis

## Seite

1	Problemstellung und Ziel	1
1.1	Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens	1
1.2	Bedeutung für die WSV	1
1.3	Untersuchungsziel	1
2	Untersuchungsdurchführung und Ergebnisse	2
2.1	Versuchstechnische Grundlagenuntersuchungen	2
2.1.1	Chloridmigrationsversuch	2
2.1.2	Chloriddiffusionsversuch	3
2.1.3	Vergleichsuntersuchungen	3
2.2	Numerische Berechnungen	5
2.2.1	Umwertung von Prüfwerten bei verschiedenen Prüfverfahren	5
2.2.2	Anpassung von Modellparametern	7
2.2.3	Validierung der Modellrechnungen	9
3	Zusammenfassung und Ausblick	9
4	Literatur	11



## Bildverzeichnis

## Seite

Bild 1:	Prinzipskizze des Migrationsapparates	2
Bild 2:	Gewinnung des Probenmaterials durch Fräsen	3
Bild 3:	Ergebnisvergleich der Materialien für die Migrationsprüfung, Prüfalter 2 Monate	4
Bild 4:	Ergebnisvergleich der Materialien für die Chlorideindringprüfung, Prüfalter 6 Monate	5
Bild 5:	Korrelation der Steigungswerte $S_{2, \text{ist}}$ mit dem Migrationskoeffizient $D_{\text{RCM}, 56}$ bei einem Prüfalter von 0,5 Jahren Chloriddiffusion	6
Bild 6:	Zuverlässigkeitsindex der Betonvarianten (a) und (b) für unterschiedliche Chloridoberflächenkonzentrationen ( $C_{\text{sdelatx}}$ 2,43 bis 3,0 M.-%)	7
Bild 7:	Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für Betone in der Wasserwechselzone	8
Bild 8:	Modelliertes und gemessenes Chloridprofil für ein Bauteil in der Wasserwechselzone	9

## Tabellenverzeichnis

## Seite

Tabelle 1 :	Kennwerte der Materialien für die Laborversuche	4
Tabelle 2 :	Soll-Steigungswerte $S_{i, \text{soll}}$	6

## Anlagenverzeichnis

<b>Anlage 1</b>	Ergebnisübersicht Vergleichsversuch Chloridmigration RCM nach BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“ und Chloriddiffusion nach DIN EN 13396 „Chlorideindringen“.
<b>Anlage 2</b>	Gehlen, C.; Osterminski, K.: Zuverlässigkeit Wasserbauwerke – Chlorideindringwiderstand. Forschungsbericht 30-F-0019 im Auftrag der BAW, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München, November 2009.

## **1 Problemstellung und Ziel**

### **1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Um die Widerstandsfähigkeit wasserbautypischer Betone und Instandsetzungsmaterialien gegen das Eindringen von Chloriden realistisch und vergleichbar bewerten zu können, wurde im Dezember 2004 das BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ herausgegeben. Damit wurde in Deutschland erstmals ein Performanceprüfverfahren sowie die Vorgehensweise zur Abschätzung der Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken bei chloridinduzierter Bewehrungskorrosion in einem Regelwerk festgeschrieben.

Das Verfahren wurde bezüglich der Probenvorbereitung, des Probenalters, der anzulegenden Spannungsdifferenz, der Prüfzeiten sowie der Abnahmekriterien auf die Anforderungen des Wasserbaus abgestimmt. Anhand des ermittelten Migrationskoeffizienten erfolgt eine Zuordnung zu den in DIN 1045 definierten Expositionsklassen XS1..3 bzw. XD1..3. Einige Problembereiche, wie beispielsweise die Berücksichtigung weiterer Prüfverfahren, wurden in dieser ersten Fassung jedoch noch ausgeklammert und sollen nun ggf. im Rahmen einer Erweiterung des Merkblattes Berücksichtigung finden. Darüber hinaus sind die Modellparameter im Hinblick auf das Sicherheitsniveau der Dauerhaftigkeitsbemessung den aktuellen Erfordernissen anzupassen. Daraus können sich u.a. auch Anpassungen der deskriptiven Vorgaben der Betonzusammensetzung ergeben.

### **1.2 Bedeutung für die WSV**

Die Dauerhaftigkeit von Wasserbauwerken im Meerwasserbereich wird maßgeblich von der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion bestimmt. Nur durch eine präzise Abschätzung des Chlorideindringwiderstands in Verbindung mit entsprechenden Bewertungs- und Planungshinweisen kann sichergestellt werden, dass die Bewehrung während der für Verkehrswasserbauwerke mit i. d. R. 100 Jahren veranschlagten planmäßigen Nutzungsdauer vor Korrosion geschützt bleibt, bzw. Instandsetzungssysteme den erforderlichen Korrosionsschutz bieten.

### **1.3 Untersuchungsziel**

Das Ziel dieses FuE-Vorhabens bestand in der Erarbeitung notwendiger Grundlagen für verschiedene Erweiterungen und Anpassungen des BAW-Merkblatts „Chlorideindringwiderstand von Beton“ sowie entsprechende Regelungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Betons bei Chloridangriff in den Zusätzlichen Technischen Vorschriften Wasserbau (ZTV-W Leistungsbereiche 215 und 219).

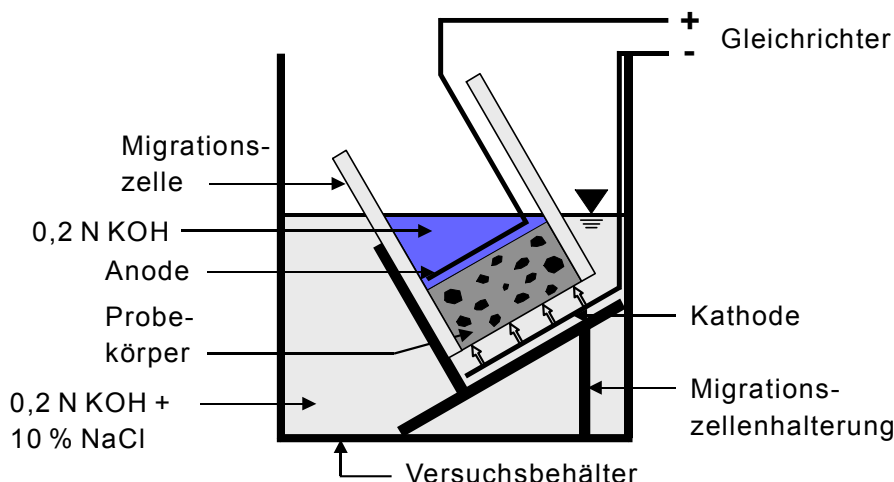
Diese Erweiterungen und Anpassungen betreffen sowohl die Überprüfung der **numerischen Berechnungsgrundlagen** unter Einbeziehung bereits gesammelter Erfahrungen sowie vorhandener Prüfergebnisse, als auch **versuchstechnische Grundlagenuntersuchungen** zur Verbesserung der Möglichkeiten einer Dauerhaftigkeitsbemessung durch den Planer. Im Rahmen der versuchstechnischen Grundlagenuntersuchungen war darüber hinaus zu prüfen, inwieweit Prüfwerte anderer Prüfverfahren direkt mit den Werten bei Prüfung mittels Migrationsverfahren nach BAW-Merkblatt vergleichbar sind.

## 2 Untersuchungsdurchführung und Ergebnisse

### 2.1 Versuchstechnische Grundlagenuntersuchungen

#### 2.1.1 Chloridmigrationsversuch

Bei dem im BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ verwendete Performance-Prüfverfahren handelt es sich um ein Schnellprüfverfahren, den Chloridmigrationsversuch (RCM-Versuch „Rapid-Chlorid-Migration“ [1], [2]). Untersucht wird dabei das Eindringen von Chloriden in eine Beton- oder Mörtelprobe unter Einfluss eines elektrischen Feldes.



**Bild 1: Prinzipskizze des Migrationsapparates**

Nach Ende der Spannungsbeaufschlagung und nach Spalten der Probe wird mittels Indikatorlösungen die Eindringtiefe der Front der freien Chloridionen ermittelt. Aus der Eindringtiefe, der Höhe der angelegten Spannung und weiteren Parametern wird der Chloridmigrationskoeffizient berechnet.

### 2.1.2 Chloriddiffusionsversuch

Alternativ kann der Chlorideindringwiderstand auch über Diffusionsverfahren ermittelt werden. Dabei wird eine Probe in einem Chloridhaltigen Medium gelagert, so dass die Chloride über Diffusionsprozesse in den Beton eindringen. Während der über mehrere Monate dauernden Lagerung werden dann mehrfach Chloridprofile aufgenommen.

Hier wurde für die Versuchsdurchführung die aktuell für Instandsetzungsmaterialien herausgegebene DIN EN 13396 „Chlorideindringen“ zugrunde gelegt. Nachteil gegenüber dem Migrationsversuch ist neben der langen Versuchsdauer von 6 Monaten insbesondere die aufwändige Probenahme, da für die Aufnahme der Chloridprofile der Probekörper schichtenweise abgefräst werden muss (siehe Bild).



**Bild 2: Gewinnung des Probenmaterials durch Fräsen**

### 2.1.3 Vergleichsuntersuchungen

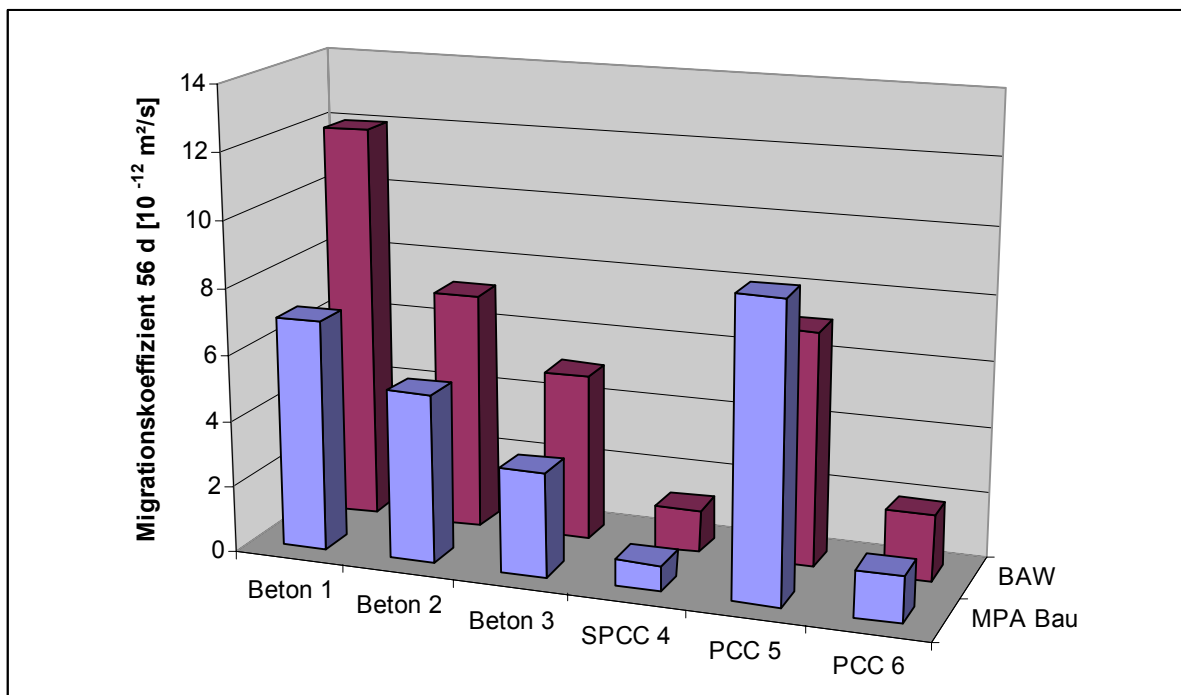
Mit den beiden beschriebenen Verfahren wurden Vergleichsuntersuchungen an je 3 verschiedenen Betonen und je 3 Instandsetzungsmörteln (PCC und SPCC) durchgeführt (siehe Tabelle 1).

Um die Streuungen gering zu halten, wurden alle Proben zentral im Baustofflabor der BAW hergestellt. Die Prüfungen erfolgten dann im Baustofflabor der BAW sowie zusätzlich parallel bei der MPA Bau der UNI München.

Mi- schung	Zement		SFA	w/(z+k·f)	Ausbreit- maß	LP- Gehalt	Dichte	Druck- festigkeit
	Art	z	f		10 min	10 min	28 d	28 d
	-	kg/m³	kg/m³		mm	Vol.-%	g/cm³	N/mm²
Beton 1	CEM I 32,5 R	300	-	0,55	385	1,8	2,30	43,2
Beton 2	CEM I 32,5 R	270	60	0,55	410	1,5	2,29	38,4
Beton 3	CEM III/A 32,5R	300	-	0,55	390	1,5	2,33	36,1
SPCC 4	TS 100	Trockenspritzen			-	-	2,25	96,3
PCC 5	TG 204	3,125 l Wasser / 25 kg			380	3,7	2,17	52,3
PCC 6	Nafufill KM 250	4,0 l Wasser / 25 kg			500	5,6	2,07	56,2

**Tabelle 1 : Kennwerte der Materialien für die Laborversuche**

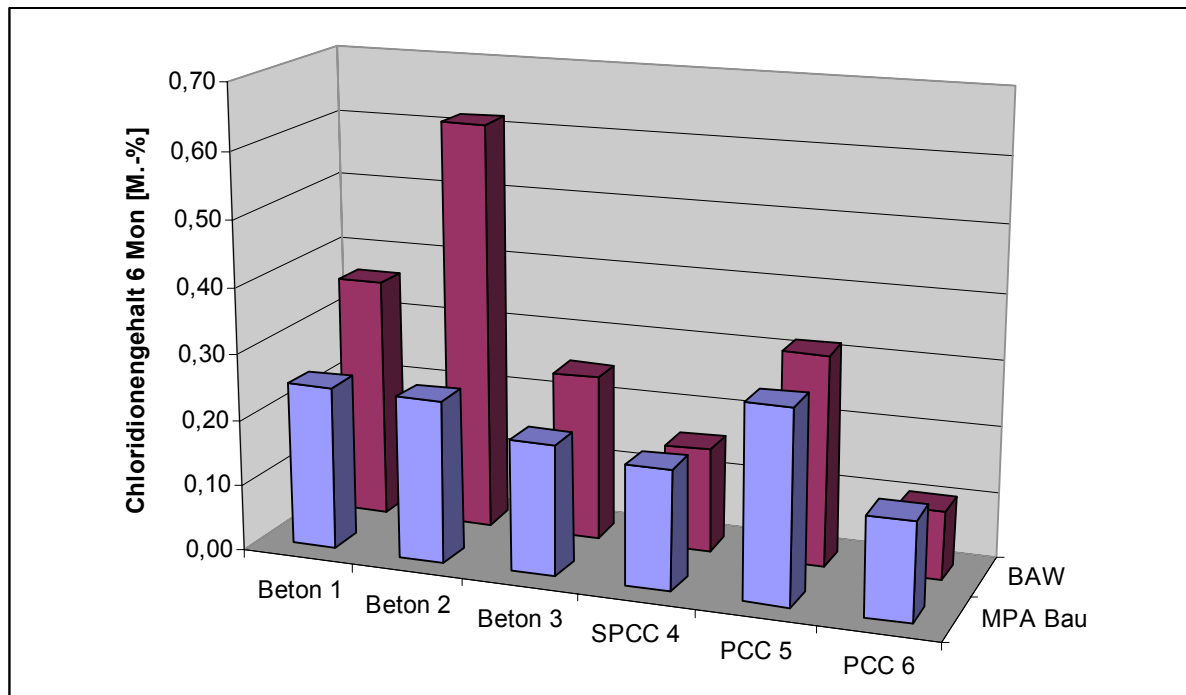
Die Chloridmigrationsprüfung nach BAW-Merkblatt im Alter von 56 Tagen ergab bei beiden Laboren die gleiche deutlich abgestufte Reihung des Chlorideindringwiderstands, wie sie anhand der Materialkennwerte zu erwarten war. Bei den Betonen lagen die Absolutwerte bei Prüfung im BAW-Labor allerdings systematisch höher.



**Bild 3: Ergebnisvergleich der Materialien für die Migrationsprüfung, Prüfalter 2 Monate**

Die Prüfung des Chlorideindringens nach DIN EN 13396 erwies sich demgegenüber als deutlich aufwändiger (Dauer 6 Monate, je Material 7 Probekörper, schwierige Gewinnung Analysematerial). Die Streuungen zwischen den Prüflaboratorien waren bei den Betonen 1 und 2 relativ groß, und auch die Reihung des Chlorideindringwiderstands war bei diesen

Betonen nicht einheitlich. Insgesamt scheint die Differenzierung zwischen den Materialien schwieriger, es ergab sich dennoch die gleiche Tendenz hinsichtlich der Bewertung des Chlorideindringwiderstands wie beim Migrationsversuch.

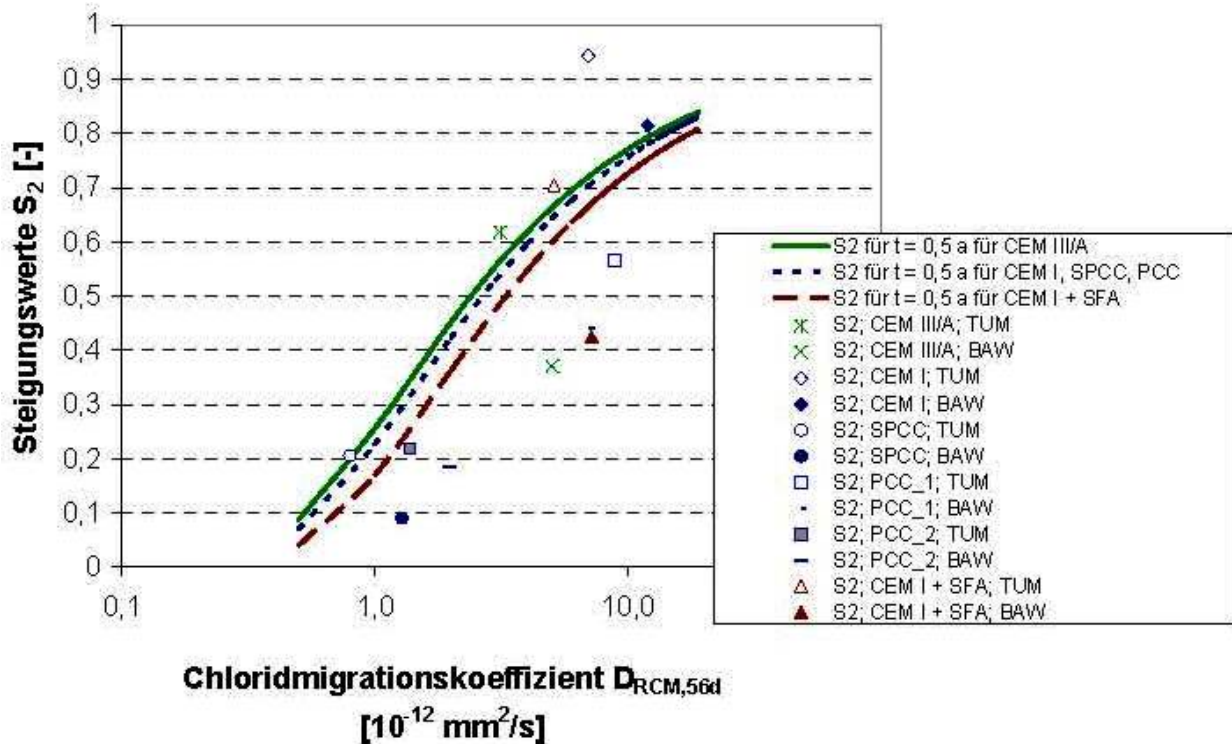


**Bild 4:** Ergebnisvergleich der Materialien für die Chlorideindringprüfung, Prüfalter 6 Monate

## 2.2 Numerische Berechnungen

### 2.2.1 Umwertung von Prüfwerten bei verschiedenen Prüfverfahren

Auf der Basis des in Laborversuchen sowie bei Bauwerksmessungen ermittelten Eindringverhaltens von Altbetonen und Instandsetzungsmaterialien wurde anschließend im Rahmen numerischer Simulationen eine Vorgehensweise zur Quantifizierung des Alterungskoeffizienten sowie zur Umwertung von Prüfwerten der Migrationsprüfung zu solchen bei der Diffusionsprüfung entwickelt. Dabei hat sich die Berechnung von Verhältniswerten aus den Chloridprofilen als zielführend erwiesen. Diese Quotienten werden Ist-Steigungswerte  $S_{i, \text{ist}}$  genannt und können Soll-Steigungswerten  $S_{i, \text{soll}}$ , die aus den Grenzwerten des BAW-Merkblatts „Chlorideindringwiderstand“ abgeleitet wurden, gegenüber gestellt werden. Das folgende Bild zeigt exemplarisch den Zusammenhang zwischen berechneten Steigungswerten  $S_{i, \text{ist}}$  und dem Chloridmigrationskoeffizienten für verschiedene Materialien.



**Bild 5:** Korrelation der Steigungswerte  $S_{2, \text{ist}}$  mit dem Migrationskoeffizient  $D_{RCM, 56}$  bei einem Prüfalter von 0,5 Jahren Chloriddiffusion

Die zur Bewertung erforderlichen Soll-Steigungswerte  $S_{i, \text{soll}}$  sind in der folgenden Tabelle für die verschiedenen Grenzwerte des BAW-Merkblatts ( $D_{RCM, 56}$  10,0 oder 5,0  $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ) dargestellt:

Exposition	XD1, XS1, XD2, XS2			XD3, XS3		
$D_{RCM, \text{Grenz}, 56d}$ [ $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ]	10			5		
$t$ [a]	0,077	0,250	0,500	0,077	0,250	0,500
$S_{1, \text{soll}}$	0,65	0,73	0,77	0,52	0,62	0,67
$S_{2, \text{soll}}$	0,57	0,68	0,73	0,39	0,53	0,60

**Tabelle 2 :** Soll-Steigungswerte  $S_{i, \text{soll}}$

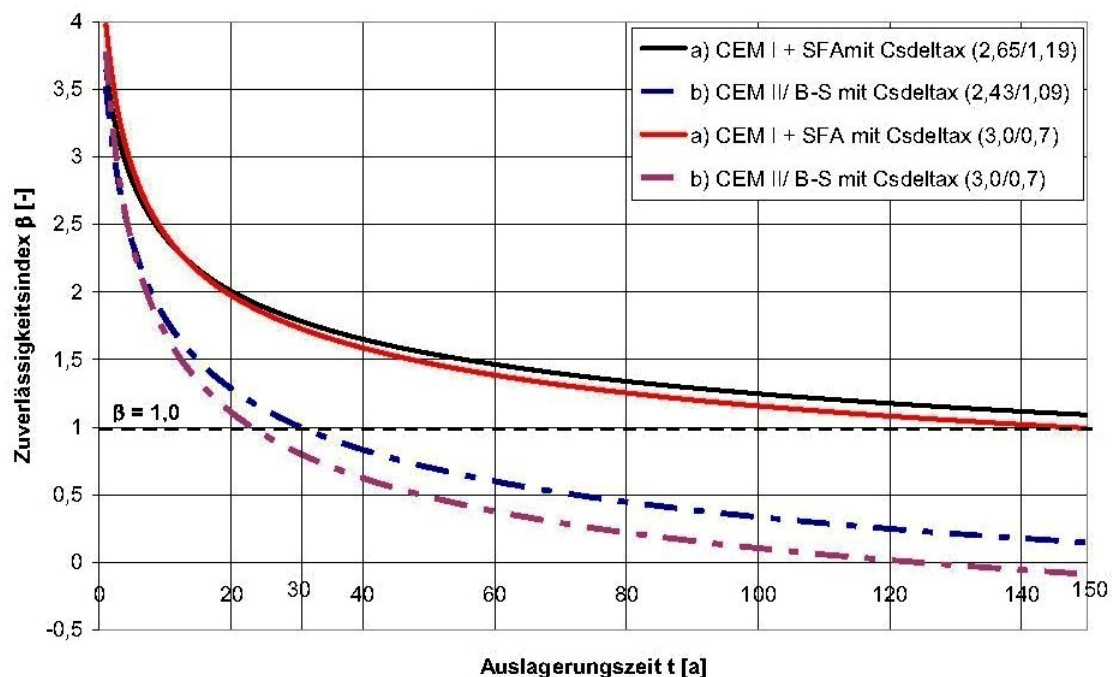
Damit kann eine Aussage getroffen werden, ob die Materialien die Soll-Anforderungen vergleichbar zur Migrationsprüfung erfüllt haben. Diese im Bild dargestellten Zusammenhänge können jedoch nur hergestellt werden, wenn die stoffliche Zusammensetzung der Materialien (insbesondere Zementart und Zusatzstoffe) bekannt ist. Allgemein gültige und für das BAW-Merkblatt handhabbare Bewertungsdiagramme können damit nicht aufgestellt werden. Die Vorgehensweise ist zudem für eine praktikable Planungshilfe im Rahmen des BAW-Merkblatts „Chlorideindringwiderstand“ sehr komplex.



## 2.2.2 Anpassung von Modellparametern

Im Rahmen numerischer Simulationen wurden weitergehende Zuverlässigkeitsbetrachtungen im Hinblick auf das vorhandene **Sicherheitsniveau** vorgenommen. Dabei wurde der Zuverlässigkeitsindex im Bereich zwischen  $\beta = 0$  (Stand der Bemessungsnomogramme im BAW-Merkblatt) und  $\beta = 1,5$  (angestrebte Sicherheit für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit von Meerwasserbauwerken) variiert.

Diese numerischen Betrachtungen wurden zunächst vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der UNI Stuttgart durchgeführt. Das nachfolgende Bild zeigt als Ergebnis exemplarisch den Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeitsindex und Nutzungsdauer für 2 Betonvarianten (CEM I + Flugasche, CEM II/B-S).



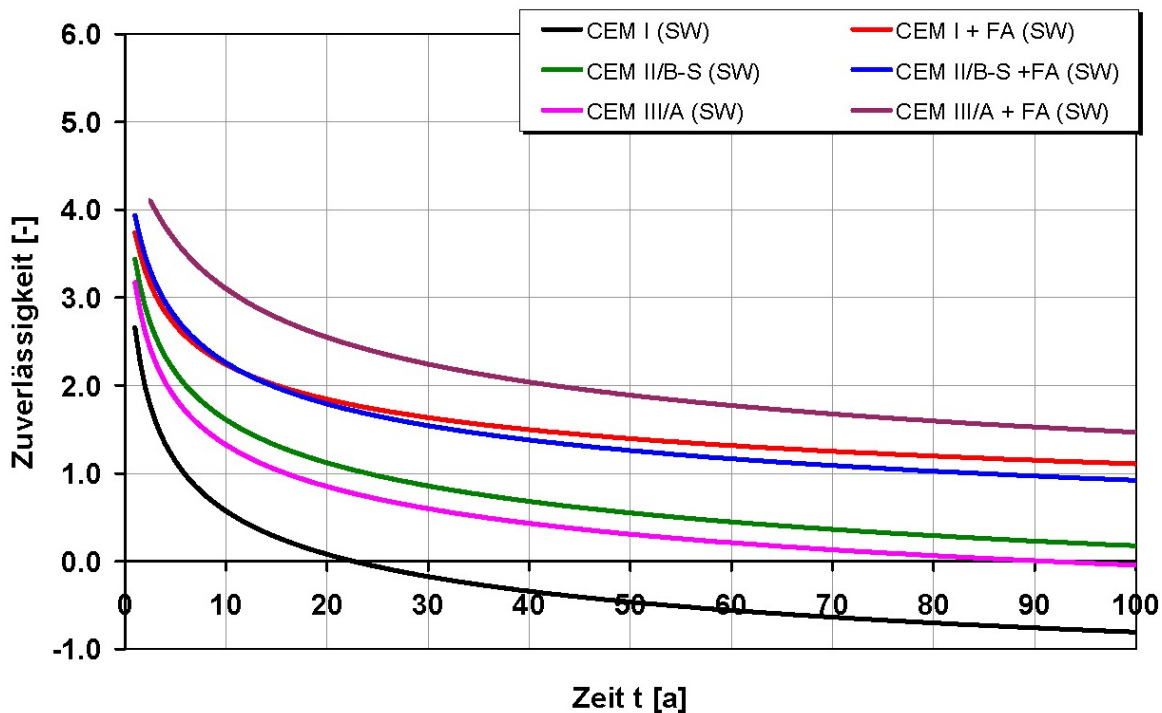
**Bild 6: Zuverlässigkeitsindex der Betonvarianten (a) und (b) für unterschiedliche Chloridoberflächenkonzentrationen (Csdeltax 2,43 bis 3,0 M.-%)**

Es zeigte sich, dass bei Zuverlässigkeiten  $\geq 1,0$  auch mit einem CEM II/B-S die im Wasserbau vorgesehene Nutzungsdauer von 80..100 Jahren nicht erreicht werden kann. Bei Betondeckungsmaßen von 60 mm ist dies nur mit Hochofenzementen (CEM III/A und CEM III/B) bzw. bei entsprechend hohen Flugaschegehalten realisierbar. Damit bestand Handlungsbedarf, durch weitere numerische Simulationen sowie ggf. Laboruntersuchungen zu prüfen, mit welchen Bindemittelkombinationen (Hüttensandgehalt im Zement, Flugaschemenge, ...) ausreichend kleine Migrationskoeffizienten erreicht werden können.



Um die zugrunde gelegten Modellparameter der Dauerhaftigkeitsbemessung auf das angestrebte Sicherheitsniveau von  $\beta = 1,5$  anzupassen, wurden daher von der Technischen Universität München weiterführende vollprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessungen zum Chlorideindringen unter pessimistischen Expositionsbedingungen (u.a. Wasserwechselzone und Spritzwasserzone von Meerwasserbauwerken) durchgeführt. Der ausführliche Bericht befindet sich in **Anlage 1**.

Insgesamt erfolgten Berechnungen für sechs für den Verkehrswasserbau typische Betonrezepturen, wobei im Hinblick auf die notwendige Nutzungsdauer auch die Betondeckung zwischen 50 und 70 mm variiert wurde. Für die Bewertung erfolgte eine vergleichende Darstellung der Zuverlässigkeit  $\beta$  über der Zeit  $t$  für die verschiedenen Parameter. Im folgenden Bild ist ein Ergebnis exemplarisch für die Spritzwasserzone bei einer Betondeckung von 60 mm dargestellt.



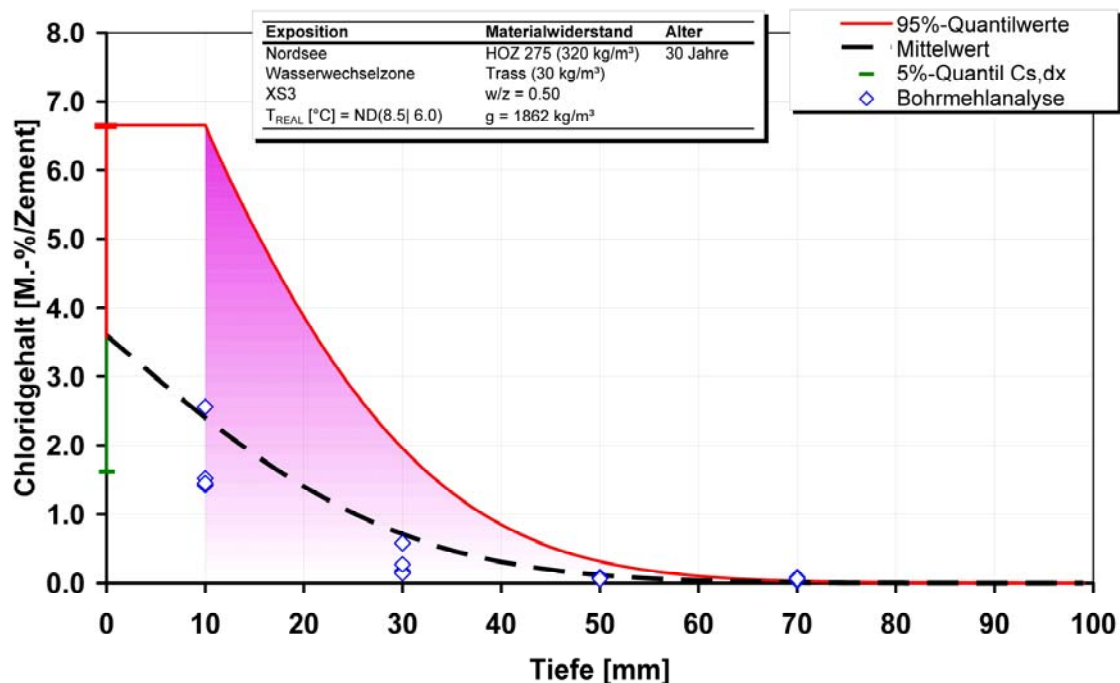
**Bild 7: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für Betone in der Wasserwechselzone**

Die Berechnungen ergaben, dass die Bindemittelart den größten Einfluss besitzt. Während reiner Portlandzement (CEM I) in der Expositionsklasse XS3 bei einer Betondeckung  $c_{\min}$  von 50 mm allenfalls für Nutzungsdauern bis 20 Jahre bei einer Zuverlässigkeit  $\beta=0$  geeignet ist, können mit der Kombination von Hochofenzement und Flugasche (CEM III/A + FA) i.d.R. deutlich höhere Chlorideindringwiderstände erreicht werden. In Verbindung mit einer geringfügigen Erhöhung der Betondeckung um 10 mm könnten wie im Bild dargestellt mit solchen Bindemittel-Flugasche-Kombinationen Lebensdauern von 100 Jahren mit der für den Verkehrswasserbau üblicherweise anzustrebenden Zuverlässigkeit von  $\beta=1,5$  realisiert werden.

### 2.2.3 Validierung der Modellrechnungen

Um die Berechnungsergebnisse zu validieren, wurden Chloridprofile für reale Meerwasserbauwerke unter konkreten Annahmen vorhergesagt und anschließend durch Aufnahme von Chloridprofilen an den Bauwerken überprüft (ausführlicher Bericht in **Anlage 1**).

Bei der Simulationsrechnung wurde jeweils das Alter, die Betonzusammensetzung sowie der Ort und die Exposition des Bauteils berücksichtigt. Wie das Bild exemplarisch für ein 30 Jahre altes Bauwerk an der Nordsee zeigt, stimmt die Modellierung (Mittelwert) sehr gut mit dem tatsächlich vorhandenen Chloridprofil (Bohrmehlanalyse) überein.



**Bild 8: Modelliertes und gemessenes Chloridprofil für ein Bauteil in der Wasserwechselzone**

## 3 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel des FuE-Vorhabens bestand in der Erarbeitung notwendiger Grundlagen für verschiedene Erweiterungen und Anpassungen des BAW-Merkblatts „Chlorideindringwiderstand von Beton“ sowie entsprechender Regelungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Betons bei Chloridangriff. Dafür wurden sowohl Laboruntersuchungen durchgeführt, als auch - unter Einbeziehung bereits gesammelter Erfahrungen sowie der Laborprüfergebnisse - die numerischen Berechnungsgrundlagen angepasst.

Im Rahmen der **Laboruntersuchungen** erfolgte eine Vergleichsuntersuchung zwischen dem im BAW-Merkblatt „Chlorideindringen“ beschriebenen Schnellmigrationsversuch RCM und einem Chloriddiffusionsversuch. Es bestätigte sich nicht nur eine bessere Handhabbarkeit des Migrationsverfahrens, sondern es zeigte sich auch, dass eine Differenzierung des Chlorideindringwiderstands von Betonen und Instandsetzungsmörteln mit diesem Verfahren sicherer möglich ist. Zudem ist eine Umwertung der Prüfergebnisse im Hinblick auf einheitliche Grenzwerte unpraktikabel. Das Migrationsverfahren wird daher als Referenzprüfung beibehalten, ein zusätzliches Diffusionsverfahren nicht in das Merkblatt aufgenommen.

Die **numerischen Berechnungen** ergaben, dass die Bindemittelart den größten Einfluss auf den Chlorideindringwiderstand besitzt. Während reiner Portlandzement (CEM I) in der Expositionsklasse XS3 bei einer Betondeckung  $c_{\min}$  von 50 mm allenfalls für Nutzungsdauern bis 20 Jahre bei einer Zuverlässigkeit  $\beta=0$  geeignet ist, können mit der Kombination von Hochofenzement und Flugasche (CEM III/A + FA) i.d.R. deutlich höhere Chlorideindringwiderstände erreicht werden. In Verbindung mit einer geringfügigen Erhöhung der Betondeckung um 10 mm könnten mit solchen Bindemittel-Flugasche-Kombinationen Lebensdauern von 100 Jahren mit der für den Verkehrswasserbau üblicherweise anzustrebenden Zuverlässigkeit von  $\beta=1,5$  realisiert werden. Die Aussagekraft der numerischen Berechnungen wurde durch Vergleiche mit Bauwerksmessungen validiert.

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse flossen in die aktuelle Überarbeitung der ZTV-W LB 215 ein. Es wurden allerdings nur entsprechende Anpassungen der deskriptiven Anforderungen an die Betonzusammensetzung (Zementarten, Flugascheanteile) gemäß den vorgenannten Erkenntnissen vorgenommen. Auf eine Erhöhung der Betondeckung wurde vorerst verzichtet, da diese Maßnahme grundsätzlich zu Nachteilen im Hinblick auf die Bildung von Rissen führen kann. Da die vorgenannten Maßnahmen nur für Nutzungsdauern bis 50 Jahre gelten, ist bei höheren Nutzungsdauern für die Expositionsklassen XS2 und XS3 eine Dauerhaftigkeitsbemessung durchzuführen.

Alle weiterführenden Untersuchungen im Zusammenhang mit der Bemessung des Chlorideindringwiderstands wurden zum Jahresende 2011 als wichtiger Baustein in das FuE-Vorhaben „Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken“ überführt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollen weitergehende Bemessungskonzepte erarbeitet werden.

Karlsruhe, 22. März 2012

**Bundesanstalt für Wasserbau**

Im Auftrag

Bearbeiter

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'J. Westendarp'.

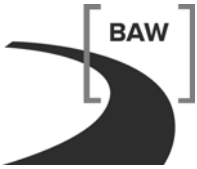
Westendarp, BDir

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Dr. Reschke'.

Dr. Reschke, TROR

#### **4 Literatur**

- [1] SIA ; Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein: Merkblatt SIA 262/1 (Ausgabe: Januar 2003) Betonbau - Ergänzende Festlegungen. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2003
- [2] NT Build 492 11.99. Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments.



## **Anlage 1**

Ergebnisübersicht Vergleichsversuch  
Chloridmigration RCM nach BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand“  
und Chloriddiffusion nach DIN EN 13396 „Chlorideindringen“.

Ergebnisse BAW

Nr.	Material	Frischmörtel/-beton			Festmörtel/-beton 28		Migrationskoeffizient (BAW-Merkblatt)				Chloridionengehalt (EN 13396)											
		ABM	LP	Dichte	Dichte	Druckfest.	56 d				28 d						91 d			182 d		
							E-12 m²/s				M.-%	mm	M.-%			M.-%			M.-%			
							mm	%	g/cm³	g/cm³			N/mm²	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1
1	Beton	385	1,8	2,36	2,30	43,2	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 7		Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 3	Probe 4	Mittel	Probe 5	Probe 6	Mittel
							11,337	10,749	13,927	12,004	0,019	1	0,235	0,381	0,31	0,658	0,780	0,72	0,496	0,556	0,53	
												5	0,156	0,240	0,20	0,373	0,347	0,36	0,332	0,288	0,31	
												9	0,084	0,153	0,12	0,278	0,236	0,26	0,246	0,266	0,26	
2	Beton	410	1,5	2,35	2,29	38,4	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1		Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							6,416	7,525	7,640	7,194	0,021	1	0,874	0,659	0,77	0,714	0,861	0,79	1,223	1,110	1,17	
												5	0,254	0,279	0,27	0,365	0,344	0,35	0,506	0,440	0,47	
												9	0,142	0,107	0,12	0,208	0,236	0,22	0,221	0,205	0,21	
3	Beton	390	1,5	2,35	2,33	36,1	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1		Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							5,495	5,566	4,122	5,061	0,021	1	0,291	0,261	0,28	0,371	0,325	0,35	0,550	0,300	0,43	
												5	0,104	0,079	0,09	0,124	0,143	0,13	0,322	0,136	0,23	
												9	0,042	0,040	0,04	0,044	0,058	0,05	0,131	0,065	0,10	
4	SPCC				2,25	96,3	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1		Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							1,420	1,413	1,022	1,285	0,025	1	0,339	0,303	0,32	0,647	0,446	0,55	0,414	0,305	0,36	
												5	0,049	0,026	0,04	0,020	0,046	0,03	0,105	0,066	0,09	
												9	0,019	0,018	0,02	0,019	0,023	0,02	0,030	0,031	0,03	
5	PCC	380	3,7	2,19	2,17	52,3	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1		Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							7,395	6,340	7,490	7,075	0,013	1	0,376	0,374	0,38	0,389	0,296	0,34	0,486	0,468	0,48	
												5	0,155	0,130	0,14	0,229	0,127	0,18	0,306	0,345	0,33	
												9	0,015	0,013	0,01	0,069	0,034	0,05	0,138	0,164	0,15	
6	PCC	500	5,6	2,07	2,06	56,2	Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 1		Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							2,019	1,933	1,962	1,971	0,015	1	0,202	0,214	0,21	0,229	0,247	0,24	0,231	0,205	0,22	
												5	0,029	0,044	0,04	0,054	0,051	0,05	0,035	0,109	0,07	
												9	0,018	0,011	0,01	0,018	0,016	0,02	0,025	0,026	0,03	

Beton 1

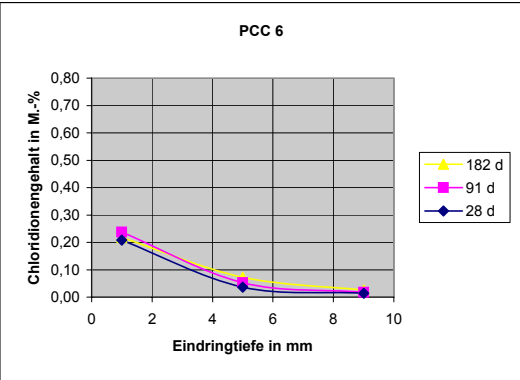
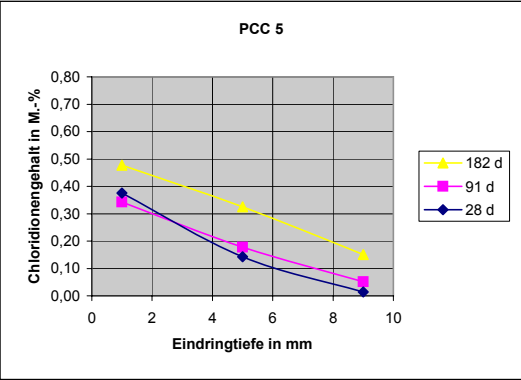
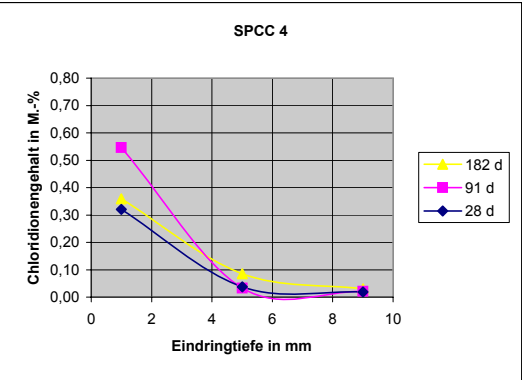
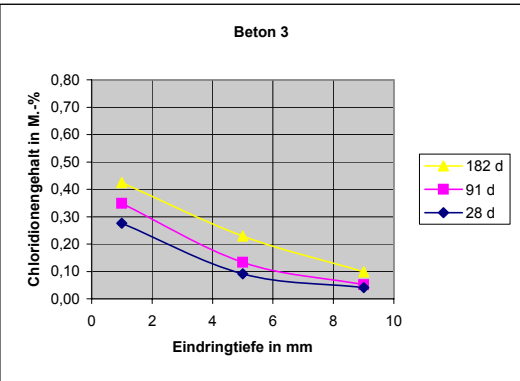
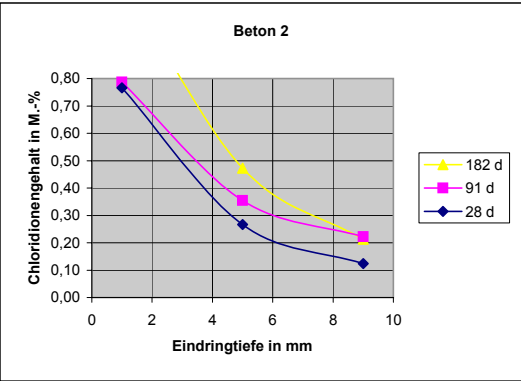
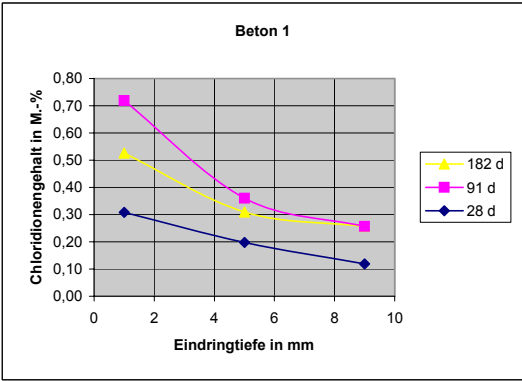
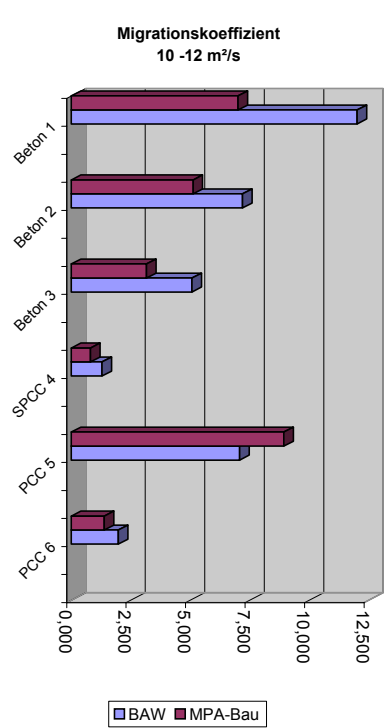
Beton 2

Beton 3

SPCC 4

PCC 5

PCC 6



Ergebnisse MPA-Bau

Nr.	Material	Frischmörtel/-beton			Festmörtel/-beton 28		Migrationskoeffizient (BAW-Merkblatt)				Chloridionengehalt (EN 13396)												
		ABM	LP	Dichte	Dichte	Druckfest.	56 d				28 d				91 d			182 d					
		mm	%	g/cm³	g/cm³	N/mm²	E-12 m²/s				M.-%	mm	M.-%			M.-%							
							Probe 1	Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 7		Probe 1	Probe 2	Mittel	Probe 3	Probe 4	Mittel	Probe 5	Probe 6	Mittel		
1	Beton 1	385	1,8	2,36	2,30	43,2						1	0,289	0,218	<b>0,25</b>	0,312	0,330	<b>0,32</b>	0,436	0,254	<b>0,35</b>		
							7,180	5,890	7,940	<b>7,003</b>		5	0,127	0,142	<b>0,13</b>	0,219	0,223	<b>0,22</b>	0,199	0,193	<b>0,20</b>		
												9	0,107	0,074	<b>0,09</b>	0,127	0,160	<b>0,14</b>	0,189	0,214	<b>0,20</b>		
2	Beton 2	410	1,5	2,35	2,29	38,4							Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel		
							5,370	5,110	4,860	<b>5,113</b>		1	0,265	0,178	<b>0,22</b>	0,287	0,236	<b>0,26</b>	0,385	0,375	<b>0,38</b>		
												5	0,137	0,115	<b>0,13</b>	0,191	0,186	<b>0,19</b>	0,212	0,200	<b>0,21</b>		
3	Beton 3	390	1,5	2,35	2,33	36,1								Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							2,990	3,370	3,100	<b>3,153</b>		1	0,302	0,270	<b>0,29</b>	0,284	0,211	<b>0,25</b>	0,335	0,285	<b>0,31</b>		
												5	0,131	0,076	<b>0,10</b>	0,126	0,099	<b>0,11</b>	0,185	0,157	<b>0,17</b>		
4	SPCC 4				2,25	96,3								Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							0,840	0,780	0,780	<b>0,800</b>		1	0,299	0,332	<b>0,32</b>	0,363	0,292	<b>0,33</b>	0,451	0,420	<b>0,44</b>		
												5	0,029	0,027	<b>0,03</b>	0,057	0,021	<b>0,04</b>	0,079	0,069	<b>0,07</b>		
5	PCC 5	380	3,7	2,19	2,17	52,3								Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							7,750	10,280	8,740	<b>8,923</b>		1	0,306	0,325	<b>0,32</b>	0,462	0,420	<b>0,44</b>	0,200	0,509	<b>0,35</b>		
												5	0,111	0,127	<b>0,12</b>	0,263	0,259	<b>0,26</b>	0,268	0,364	<b>0,32</b>		
6	PCC 6	500	5,6	2,07	2,06	56,2								Probe 2	Probe 3	Mittel	Probe 4	Probe 5	Mittel	Probe 6	Probe 7	Mittel	
							1,350	1,390	1,400	<b>1,380</b>		1	0,185	0,190	<b>0,19</b>	0,262	0,300	<b>0,28</b>	0,325	0,285	<b>0,31</b>		
												5	0,093	0,155	<b>0,12</b>	0,064	0,048	<b>0,06</b>	0,110	0,103	<b>0,11</b>		

Beton 1

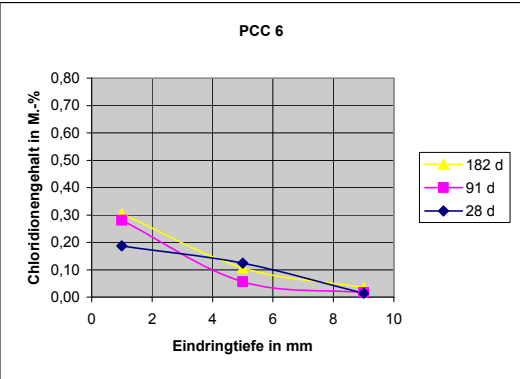
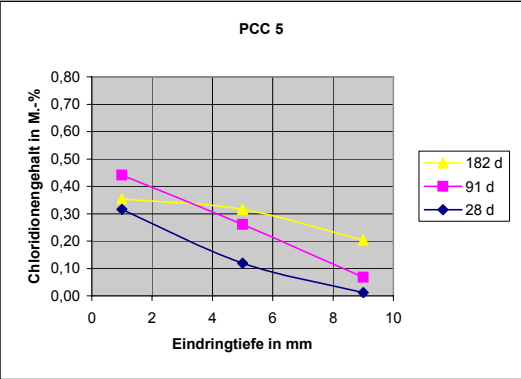
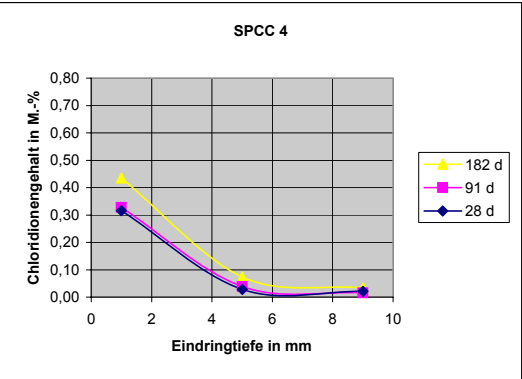
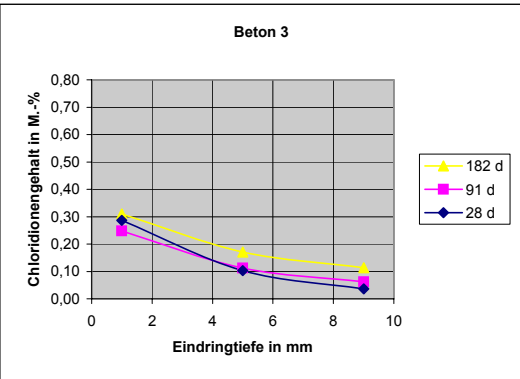
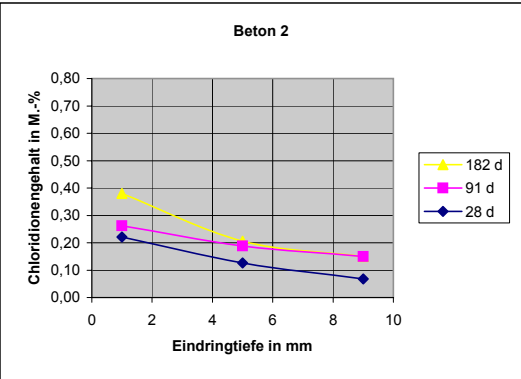
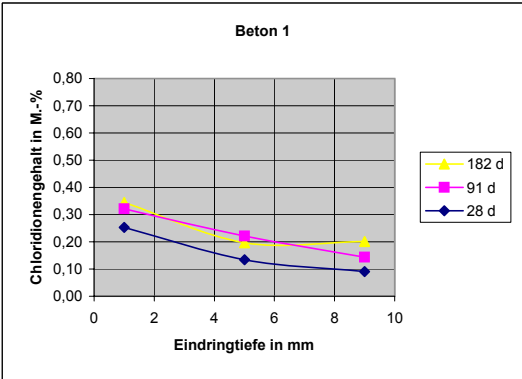
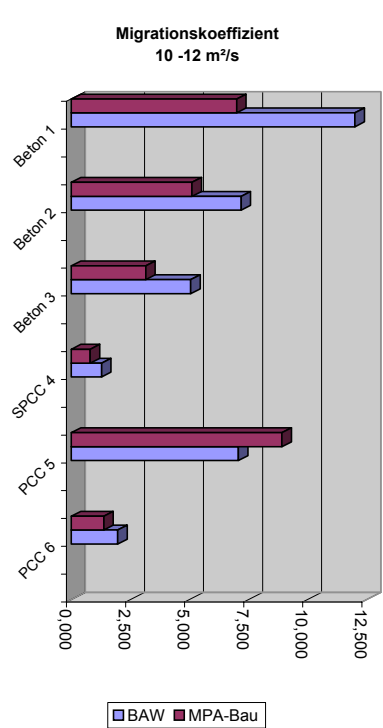
Beton 2

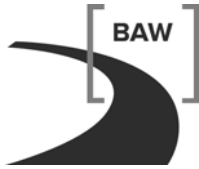
Beton 3

SPCC 4

PCC 5

PCC 6





## **Anlage 2**

TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung cbm  
Forschungsbericht Nr. 30-F-0019 vom 23.11.2009  
„Zuverlässigkeit Wasserbauwerke – Chlorideindringwiderstand“



Bundesanstalt für Wasserbau  
Herrn Dr.-Ing. Reschke  
Kußmaulstr. 17  
76187 Karlsruhe

Lehrstuhl für Baustoffkunde  
und Werkstoffprüfung  
Universitäts- Professor  
Dr.-Ing. C. Gehlen

Baumbachstraße 7  
D-81245 München  
Tel. +49 (0) 89-289-2 70 61  
Fax +49 (0) 89-289-2 70 64  
cbm@cbm.bv.tum.de

München, den 23.11.09

## **FORSCHUNGSBERICHT**

**Nr.: 30-F-0019**

<b>Thema:</b>	Zuverlässigkeit Wasserbauwerke - Chloridein- dringwiderstand
<b>Auftraggeber:</b>	Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
<b>Projektleitung:</b>	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen
<b>Sachbearbeiter:</b>	Dipl.-Ing. Kai Osterminski



## INHALTSVERZEICHNIS

1	MOTIVATION UND ZIEL.....	3
2	VOLLPROBABILISTISCHES SICHERHEITSKONZEPT .....	5
3	MODELLIERUNG DER ZUVERLÄSSIGKEIT (GRENZZUSTAND „DEPASSIVIERUNG DER BEWEHRUNG“).....	7
3.1	Eingabewerte.....	8
3.2	Ergebnisse .....	14
3.3	Diskussion.....	17
4	MODELLIERUNG VON CHLORIDPROFILIEN .....	18
4.1	Eingabewerte.....	21
4.2	Ergebnisse .....	22
4.3	Diskussion.....	30
5	ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND AUSBLICK .....	31
	LITERATUR.....	32

## 1 Motivation und Ziel

Die Herstellung von Wasserbauwerken ist neben der Normung (DIN 1045 [1]) außerdem noch durch zusätzliche technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) geregelt. In den letzteren werden die Konstruktion/Bemessung, die Anforderungen an den Beton und die Bauausführung (ZTV-W LB 215 [2], [3]) sowie die Vorgehensweise bei Schutz und Instandsetzung von Wasserbauwerken (ZTV-W LB 219[4], [5]) näher spezifiziert. Ergänzend zu den ZTV-W liegen BAW-Merkblätter vor, in welchen für bestimmte Expositionen Performance-Prüfungen einschließlich der für den Verkehrswasserbau relevanten Abnahmekriterien festgelegt sind. Für die Gewährleistung bzw. Überprüfung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen stehen heutzutage neben den in den Regelwerken verwendeten empirischen Expositionsklassen noch probabilistische Bemessungsansätze zur Verfügung [6]. Dazu wird im Anhang J des DIN FB 100[7] geregelt, dass eine Verwendung dieser neuen „leistungsbezogenen“ Methoden unter bestimmten Randbedingungen, u. a. Vereinbarung von Nutzungsdauer und Zuverlässigkeit des Bauwerks hinsichtlich definierter Versagensmechanismen, möglich ist. Die Zuverlässigkeiten, die für die Gewährleistung der Dauerhaftigkeit in Abhängigkeit von maßgebenden Schädigungsmechanismen (hier: Bewehrungskorrosion) benötigt werden, sind vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) in einem Positionspapier unter Wirtschaftlichkeitsaspekten aufgeführt worden [8]. Darin wird für Meerwasserbauwerke mit den zugehörigen Expositionsklassen XS2 und XS3 eine Mindestzuverlässigkeit von  $\beta_0 = 0,5$  gefordert. Im Fall eines schwer zugänglichen Bauwerks, welches nicht durch Inspektionen überwacht werden kann, erhöht sich die geforderte Zuverlässigkeit auf  $\beta_0 = 1,5$ . Letzteres trifft auf einen Großteil aller Meerwasserbauwerke zu.

Innerhalb des Forschungsvorhabens sollen nun vollprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessungen hinsichtlich Chlorideindringens durchgeführt werden. Die Ergebnisse sollen zur Einordnung der aktuell geforderten Bautechnik, den Forderungen des Positionspapiers des DAfStb, führen.

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Ergebnisse des ersten Arbeitspakets, zu dem das Centrum Baustoffe und Materialprüfung der TU München von der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe am 30.04.2009 beauftragt wurde. Das Arbeitspaket umfasst die Modellierung der Zuverlässigkeit für den Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung“ und die Modellierung von Chloridprofilen für angeforderte Bauwerke/Bauteile. Bild 1 stellt das Arbeitspaket 1 schematisch mit den untersuchten Expositionsbedingungen und Betonzusammensetzungen dar.



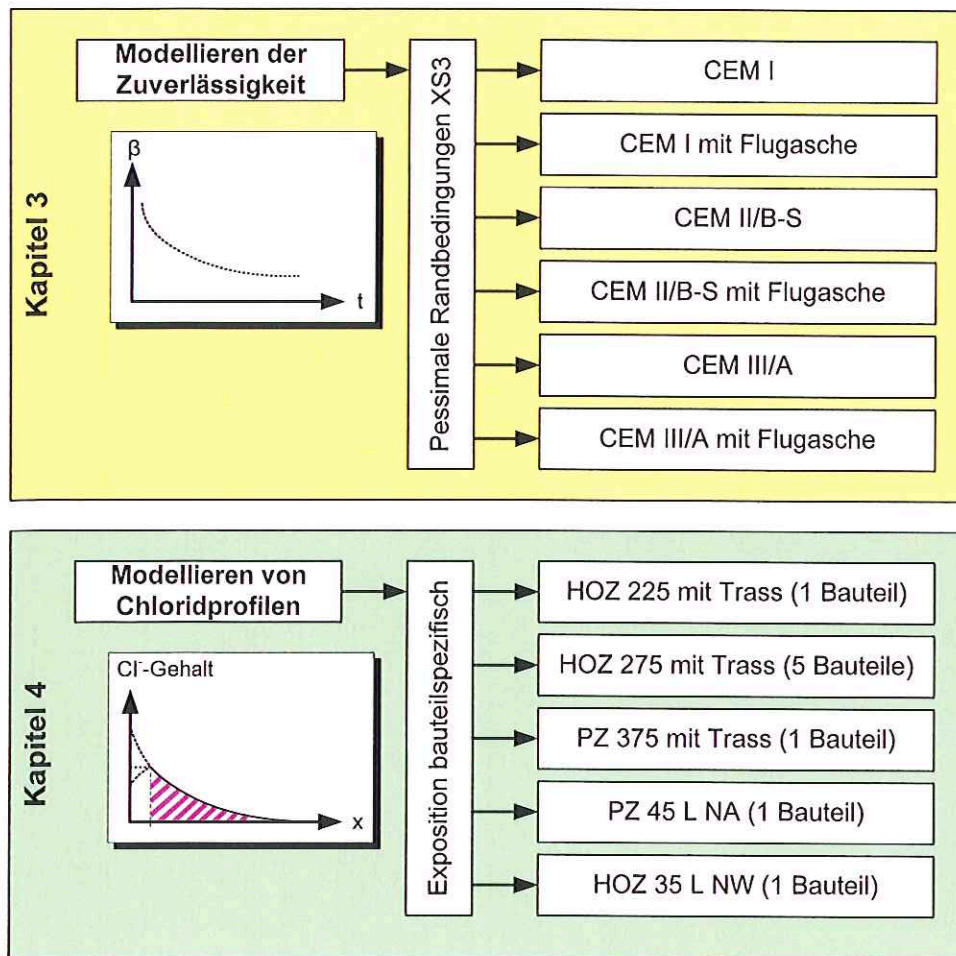


Bild 1: Überblick über das Forschungsvorhaben

## 2 Vollprobabilistisches Sicherheitskonzept

Bei der Bemessung von Stahlbetonbauteilen auf Dauerhaftigkeit können neben den in der Normung [1] geforderten Grenzwerten für Betondeckung, w/z-Wert und Festigkeitsklasse aus den Expositionsklassen auch vollprobabilistische Bemessungsansätze angewandt werden. Hierbei wird analog zur Lastbemessung berücksichtigt, dass die Einwirkung  $S$  und der Materialwiderstand  $R$  streuende Parameter sind. Um die Zuverlässigkeit des Bauteils hinsichtlich des Vermeidens eines Grenzzustands zu bestimmen, wird die Differenz aus Widerstand und Einwirkung berechnet, Gleichung 1.

$$Z = R - S$$

1

mit  $Z$ : Zuverlässigkeit  
 $R$ : Widerstand  
 $S$ : Einwirkung

Unter der Annahme, dass es sich bei der Einwirkung und dem Materialwiderstand um normal verteilte Größen handelt, ist die Zuverlässigkeit  $Z$  ebenfalls als normal verteilt anzunehmen, Bild 2. Der Bereich der Zuverlässigkeitsverteilung, welcher sich links von der Ordinatenachse befindet, definiert den Versagensbereich. Der Flächeninhalt dieses Versagensbereichs ergibt die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$ . Für eine Normalverteilung ist die Versagenswahrscheinlichkeit mit dem Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  über den Zusammenhang von Gleichung 2 verknüpft. Für gängige Versagenswahrscheinlichkeiten sind die zugehörigen Zuverlässigkeitsindizes in Tabelle 1 angegeben.

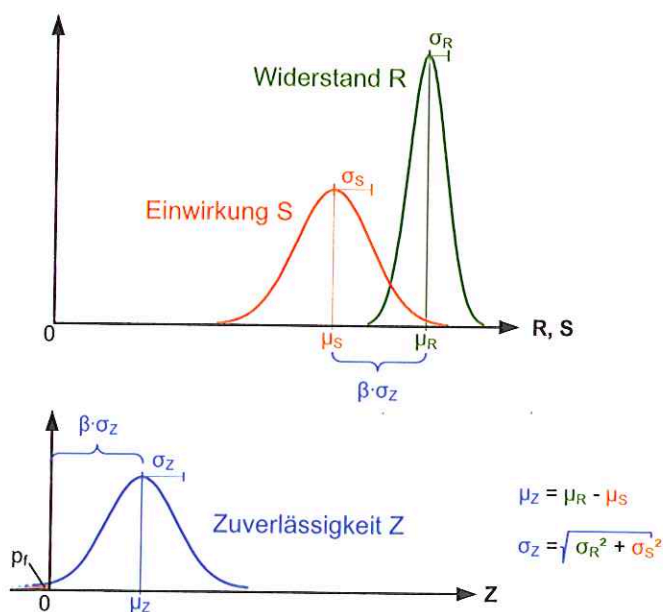


Bild 2: Subtraktion zweier normal verteilter Größen zur Berechnung der Zuverlässigkeit

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = \Phi(-\beta)$$

2

mit  $p_f$ : Versagenswahrscheinlichkeit  
 $\Phi(\ )$ : Standardnormalverteilung  
 $\beta$ : Zuverlässigkeitsindex  
 $\mu_z$ : Mittelwert der Zuverlässigkeit  
 $\sigma_z$ : Standardabweichung der Zuverlässigkeit

Tabelle 1: Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  mit zugehörigem Zuverlässigkeitsindex für eine Normalverteilung

$\mu_z > 0$		$\mu_z < 0$	
$p_f$ [%]	$\beta$ [-]	$p_f$ [%]	$\beta$ [-]
50,0	0,000	50,0	0,000
30,8	0,500	69,2	-0,500
15,9	1,000	84,1	-1,000
6,7	1,500	93,3	-1,500
5,0	1,645	95,0	-1,645
1,0	2,326	99,0	-2,326
0	>3,900	≈100	-3,900

Die oben dargestellten Zusammenhänge gelten nur für die vereinfachte Annahme, dass die Parameter  $R$ ,  $S$  und daraus folgend auch  $Z$  normalverteilt sind. Gegenüberstellungen/Bemessungen von realistischen Bauwerkssituationen sind in der Regel jedoch komplexer. Einwirkung und Widerstand sind Parameter, deren Verhalten häufig (zeitliche Entwicklung, Reaktion auf Exposition, etc.) durch funktionale Zusammenhänge abgebildet werden. Diese komplexe Situation führt dazu, dass eine Berechnung nur mittels entsprechender Computerprogramme (z.B. [9]) durchgeführt werden kann.



### 3 Modellierung der Zuverlässigkeit (Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung“)

Die Modellierung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen gegenüber Bewehrungskorrosion kann nach Tuutti [10] in zwei Zeitphasen unterteilt werden, Bild 3. Zu Beginn steht die Einleitungsphase, in der im Wasser gelöste Chloride oder in der Luft enthaltenes Kohlendioxid ins Betongefüge eindringen. Erreicht der Chloridgehalt auf Höhe der Bewehrung ein kritisches korrosionsauslösendes Niveau oder senkt die durch CO<sub>2</sub> hervorgerufenen Carbonatisierung des Betons den pH-Wert in dieser Höhe auf unter neun herab, dann endet die erste Zeitphase mit dem Ereignis der Depassivierung des Stahls. Dieser Zeitpunkt ist, wenn hierfür notwendige Korrosionsbedingungen vorliegen, gleichbedeutend mit dem Beginn der zweiten Zeitphase - der Zerstörungsphase mit aktiver Korrosion des Bewehrungsstahls. Die Modellierung der Zerstörungsphase ist momentan noch ein Thema, mit dem sich die Forschung [11] beschäftigt. Für die Einleitungsphase (hier die Depassivierung infolge Chlorideindringens) existieren jedoch bereits validierte und erprobte Modelle, von denen eines im Folgenden näher erläutert wird.

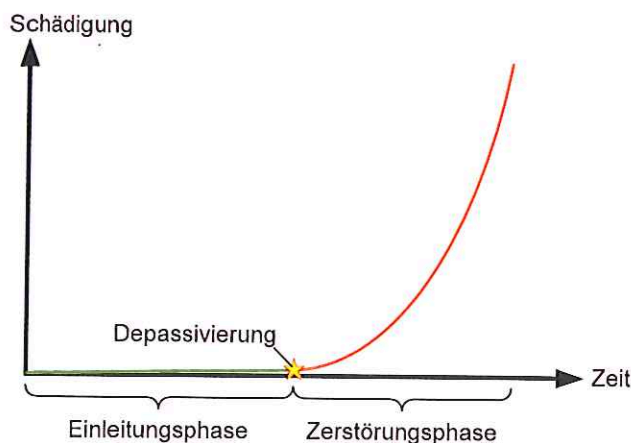


Bild 3: Schädigung eines Stahlbetonbauteils infolge Bewehrungskorrosion nach Tuutti [10]

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit bezüglich des Eindringens von Chloriden in Beton wird die Grenzzustandsgleichung nach [6] verwendet:

$$p_f = p\{C_{crit.} - C(d_e, t) < 0\}$$

3

mit  $p\{\}$ : Wahrscheinlichkeit[-]

$C_{crit.}$ : kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt [M.-%/Zement]

$C()$ : Chloridgehalt [M.-%/Zement]

$d_e$ : Betondeckung [mm]

$t$ : Zeit [a].

Hierin wird der Chloridgehalt  $C(d_e, t)$  nach Gleichung 4 berechnet.



$$C(d_c, t) = (C_{S, \Delta x} - C_0) \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{d_c - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{e^{b_c \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{IST}} \right)} \cdot D_{RCM,0} \cdot k_t \cdot \left( \frac{t_0}{t} \right)^a} \cdot t}} \right) \right]$$

4

mit	$C_{S,0(\Delta x)}$ :	(Ersatz-)Oberflächenchloridkonzentration [M.-%/Zement]
	$C_0$ :	Eigenchloridgehalt des Zements [M.-%/Zement]
	$\operatorname{erf}()$ :	Gauss'sche Fehlerfunktion [-]
	$\Delta x$ :	Tiefe der Konvektionszone [mm]
	$b_c$ :	Aktivierungsenergie [K]
	$T_0$ :	Standardtesttemperatur [K]
	$T_{IST}$ :	Temperatur am Bauwerk [K]
	$D_{RCM,0}$ :	Chloridmigrationskoeffizient [mm <sup>2</sup> /a]
	$k_t$ :	Transferparameter der Testmethode [-]
	$t_0$ :	Referenzzeitunkt [a]
	$a$ :	Alterungsexponent [-]

### 3.1 Eingabewerte

Die Eingabewerte von Gleichung 3 und 4 werden, soweit vorhanden, gemäß den Anforderungen an die Betonzusammensetzung und Exposition aus der Literatur oder aus eigenen Erfahrungswerten entnommen. Die Parameter, für die nur wenige Informationen vorhanden sind, werden auf Grundlage von Erfahrungen mit den dahinter stehenden Zusammenhängen abgeschätzt (Alterungsexponent für Kompositbindemittel).

Im Folgenden werden die zwei hier untersuchten für die Modellierung des Chlorideindringens maßgebenden Expositionen erläutert, Bild 4:

Unterwasserzone (ständig unter Wasser bzw. Tidenhub):	In diesem Bereich kann davon ausgegangen werden, dass Chloride maßgeblich durch Diffusion in das Betongefüge eindringen. Für die Modellierung bedeutet dies, dass sich keine Konvektionszone ausbildet, vgl. [12] und Bild 4. Die Streuung der Chloridoberflächenkonzentration $C_{S,0}$ ist dabei eher als gering einzuschätzen (Variationskoeffizient $v=25\%$ ).
---	---

**Spritzwasserzone:** In der Spritzwasserzone wird eine unregelmäßige Befeuchtung der Oberfläche angesetzt. Dies wird mit dem Ansetzen einer Konvektionszone und einer erhöhten Streuung der Chloridoberflächenkonzentration berücksichtigt ( $v=45\%$ ), vgl. Bild 4.

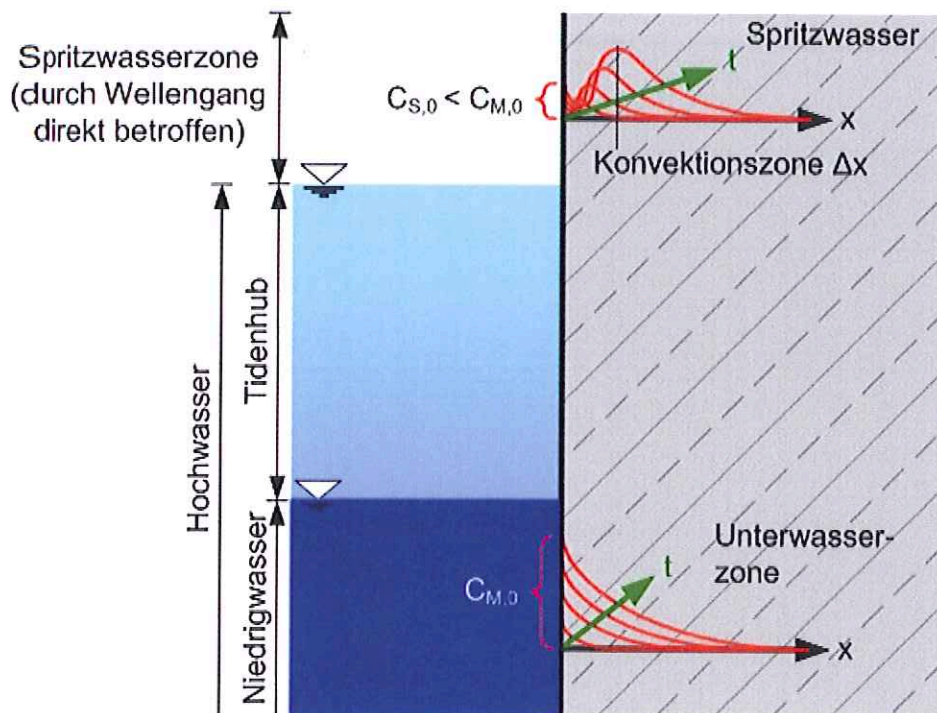
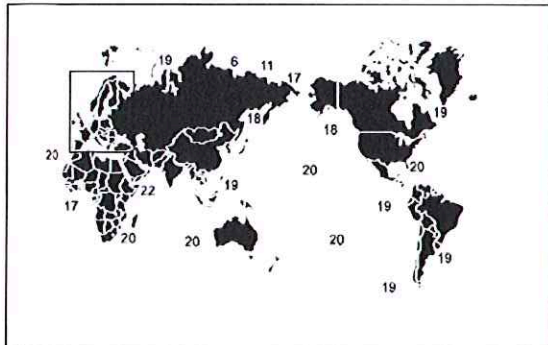


Bild 4: Qualitative Darstellung der angenommenen Chloridprofile an Meerwasserbauwerken ( $C_{M,0}$ : Meerwasserchloridkonzentration)

Nach [12] variiert die Meerwasserchloridkonzentration weltweit zwischen 4 g/l (für Baltische See) und 22 g/l (für Persischer Golf). Aus Bild 5 kann die für die Deutsche See ungünstigste da höchste Chloridkonzentration für Nordsee mit 20 g/l entnommen werden.

## Übersicht



## Detail

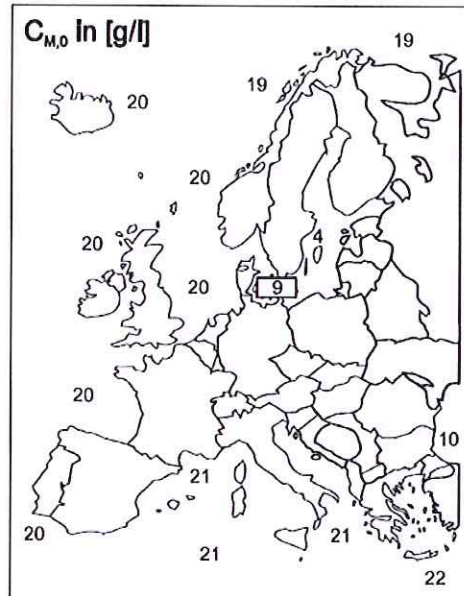


Bild 5: Chloridgehalt von Meerwasser [12]

Die sechs zu untersuchenden **Betonzusammensetzungen** sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Betonzusammensetzung für die Modellierung

Zementart [-]	z [kg/m³]	f [kg/m³]	w/(z+k f) [-]	Gesteins- körnung [-]	LP- Gehalt [Vol.-%]	maßgebende Expositions- klassen [-]	Festigkeits- klasse [-]
CEM I 32,5 R	320	0	0,45	A/B 16 (Rheinkies)	4,5	XS3, XF4, XM1	C30/37
	270	60					
CEM II/B-S 32,5 R	320	0					
	270	60					
CEM III/A 32,5 N	320	0					
	270	60					

Zusatzmittel: BV bzw. FM und LP-Bildner

In Abhängigkeit vom Meerwasserchloridgehalt, der Exposition und den Betonzusammensetzungen wurden die **(Ersatz-)Oberflächenchloridgehalte** gewählt und nach Tang [13] nachvollzogen, Tabelle 3. Die **Konvektionszone** wurde je nach Exposition nach [12] angesetzt oder vernachlässigt, vgl Tabelle 5.



Tabelle 3: Chloridgehalt auf der Höhe der (Ersatz-)Oberfläche  $C_{S,\Delta x}$  in [M.-%/Zement]

Beton/Bindemittel	Typ	Verteilung			Quelle
		m	s	v	
Unterwasserzone					
CEM I	LND	2,50	0,63	25%	Schätzung nach [13]
CEM I mit Flugasche		2,70	0,68	25%	
CEM II/B-S		2,90	0,73	25%	
CEM II/B-S mit Flugasche		3,10	0,78	25%	
CEM III/A		3,50	0,88	25%	
CEM III/A mit Flugasche		3,90	0,98	25%	
Spritzwasserzone					
CEM I	LND	2,50	1,13	45%	Schätzung nach [13]
CEM I mit Flugasche		2,70	1,22	45%	
CEM II/B-S		2,90	1,31	45%	
CEM II/B-S mit Flugasche		3,10	1,40	45%	
CEM III/A		3,50	1,58	45%	
CEM III/A mit Flugasche		3,90	1,76	45%	

Des Weiteren wurden die Ergebnisse von Schnellchloridmigrationsversuchen, die am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München durchgeführt wurden, in einer Datenbank zusammengefasst. Zusätzlich wurden weitere Daten vom Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) [14] in diese Datenbank eingespeist. Die Ergebnisse der gemeinsamen **Chloridmigrationskoeffizienten**-Datenbank, die auf die Anforderung der Betone passen, wurden für die Modellierung quantifiziert (Bild 6).

Der effektive Widerstand des Betons gegen Chlorideindringen ist ein zeit-, temperatur- und materialabhängiger Parameter ( $D_{\text{eff,C}} = f(D_{\text{RCM},0}, t)$ ). Die notwendigen Eingangsgrößen hierfür wurden in [12] untersucht (ausgenommen: Betonzusammensetzungen modernerer Betone). In [12] wurde der **Alterungsexponent a** für vier „Betontypen“ quantifiziert. Diese Ergebnisse und die Annahmen (Ann. in Tabelle 4) für die im Rahmen dieser Forschung benötigten Betonzusammensetzungen sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

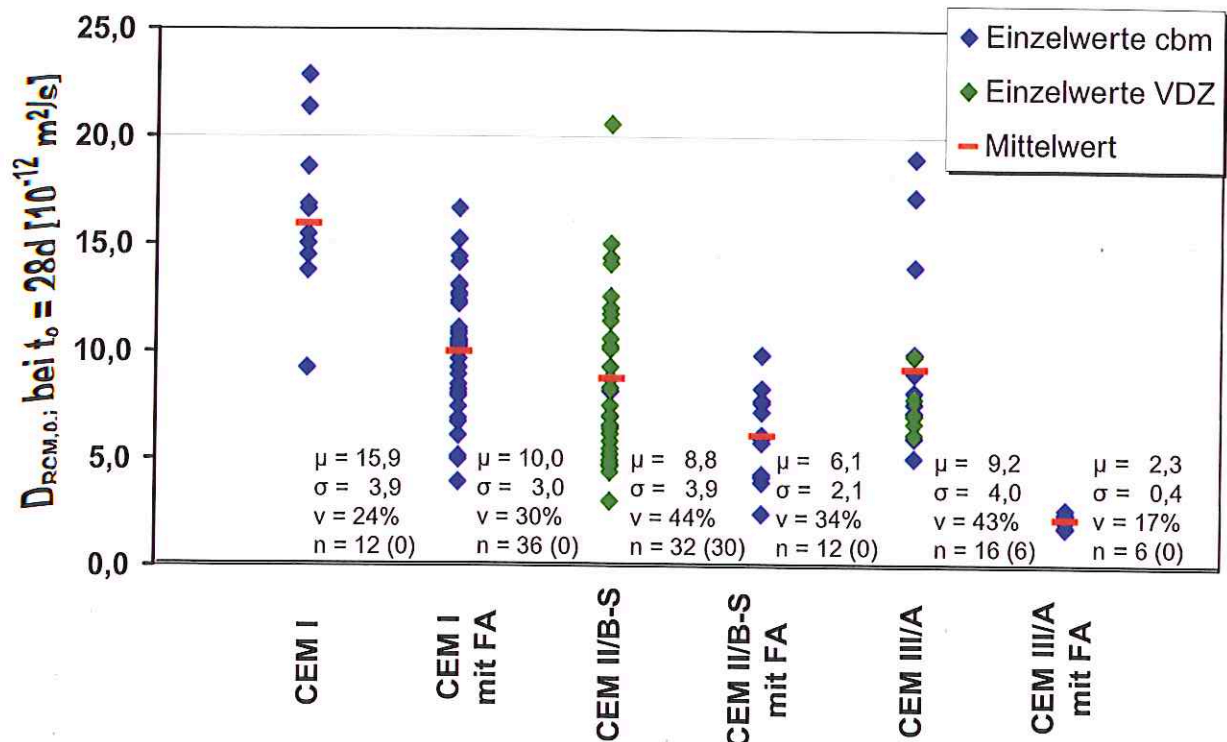


Bild 6: Ergebnisse der Quantifizierung des Chloridmigrationskoeffizienten und Rückrechnung auf den 28 Tage Referenzwert  $D_{RCM,0}$  nach [15];  $D_{RCM,0}$  wurde normalverteilt angesetzt

Tabelle 4: Alterungsexponent für sieben Betone

Beton/Bindemittel	Typ	m	s	a	b	v	Quelle
<b>Portlandzementbeton</b>							
CEM I, Betongüte: $0,40 \leq \omega \leq 0,60$	beta	0,30	0,12	0,00	1,00	40%	[12]
<b>Portlandflugaschezementbeton</b>							
$f \geq 0,20$ ; $k=0,50$ ; Betongüte: $0,40 \leq \omega_{Aqv} \leq 0,60$	beta	0,60	0,15	0,00	1,00	25%	[12]
<b>Portlandhüttenzementbeton</b>							
CEM II/B-S	beta	0,38	0,11	0,00	1,00	30%	Ann.
<b>Portlandhüttenzementbeton mit Flugasche</b>							
CEM II/B-S + FA	beta	0,50	0,15	0,00	1,00	30%	Ann.
<b>Hochofenzementbeton</b>							
CEM III/B, Betongüte: $0,40 \leq \omega \leq 0,60$	beta	0,45	0,20	0,00	1,00	44%	[12]
<b>Hochofenzementbeton</b>							
CEM III/A	beta	0,40	0,12	0,00	1,00	30%	[12]
<b>Hochofenzementbeton mit Flugasche</b>							
CEM III/A + FA	beta	0,50	0,12	0,00	1,00	63%	Ann.

Die **Betondeckung** wurde nach der nachfolgenden Strategie angesetzt. In der Normung wird für die Expositionsklasse XS3 eine Betondeckung von 50 mm angesetzt. Weiterhin soll ein Sicherheitsniveau eingehalten werden, welches 5% der ausgeführten Betondeckung zulässt, die diesen

710-1018215



Wert unterschreitet. Für diese Bedingungen wurde eine Normalverteilung angenommen, die einen Mittelwert von 60 mm hat. Die Standardabweichung errechnet sich dann über das 5%-Quantil der Normalverteilung, vgl. Gleichung 5.

$$W_{0,05} = \mu + \sigma \cdot u_{0,05}$$

5

mit  $W_{0,05}$ : Wert der normalverteilten Größe, die den Flächeninhalt der Verteilung in 5% und 95% teilt [mm]

$\mu$ : Mittelwert der normalverteilten Größe [mm]

$\sigma$ : Standardabweichung der normalverteilten Größe [mm]

$u_{0,05}$ : 5% – Quantile der Normalverteilung [-].

Mit  $u_{0,05} = -1,645$  ergibt sich für die angestrebte Größe  $W_{0,05} = 50$  mm und dem Mittelwert  $\mu = 60$  mm eine Standardabweichung von 6 mm. Des Weiteren soll ermittelt werden, wie stark sich eine Erhöhung der Anforderung von  $W_{0,05} = 50$  mm auf 60 mm auf die berechnete Zuverlässigkeit der Betone auswirkt. Im gleichen Maße wurde der Mittelwert auf 70 mm erhöht, was gemäß Gleichung 5 ebenfalls eine Standardabweichung von 6 mm zur Folge hat. Diese Annahmen sind in Bild 7 und Tabelle 5 zusammengefasst.

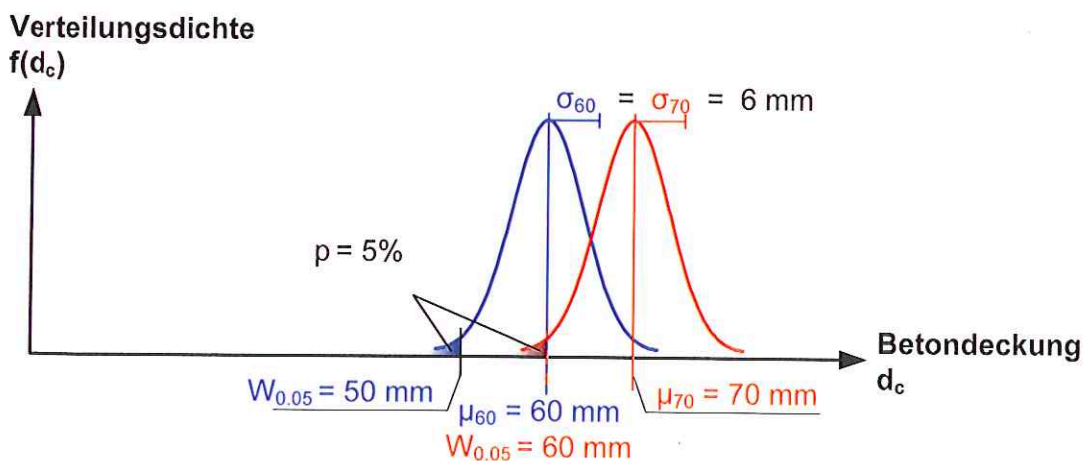


Bild 7: Darstellung der Wahl der Verteilungsparameter für die Betondeckung

Der **kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt** wurde in [12] quantifiziert. Weitere Parameter sind in Tabelle 5 stochastisch beschrieben.

Tabelle 5: Zusammenstellung der sonstigen für die Modellierung benötigten Parameter

Beton/Bindemittel	Typ	Verteilung					Quelle
		m	s	a	b	v	
krit. korrosionsausl. Chloridgehalt $C_{crit}$ [M.-%/zem]	beta	0,60	0,15	0,20	2,00	25%	[12]
Betondeckung $d_c$ [mm]	ND	60	6	-	-	10%	[16,17, 18]
		70	6	-	-	9%	
Temperaturabhängigkeit							
Aktivierungsenergie $b_e$ [K]	ND	4800	700	-	-	15%	[12]
Temperatur vor Ort $T_{IST}$ [°C]	ND	10	10	-	-	100%	Ann.
Tiefe der Ersatzoberfläche $\Delta x$ [mm]	beta	8,9	5,6	0,0	50	63%	[12]

### 3.2 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Zuverlässigkeiten dargestellt, die nach den Gleichungen 3 und 4 und unter Zuhilfenahme der Eingangswerte aus Kapitel 3.1 mit dem Programmpaket STRUREL [9] berechnet wurden. Bild 8 bis Bild 9 zeigen die Ergebnisse der Betondeckung von ND(60 mm|6 mm) für die zwei untersuchten Expositionen (Unterwasserzone und Spritzwasserzone).

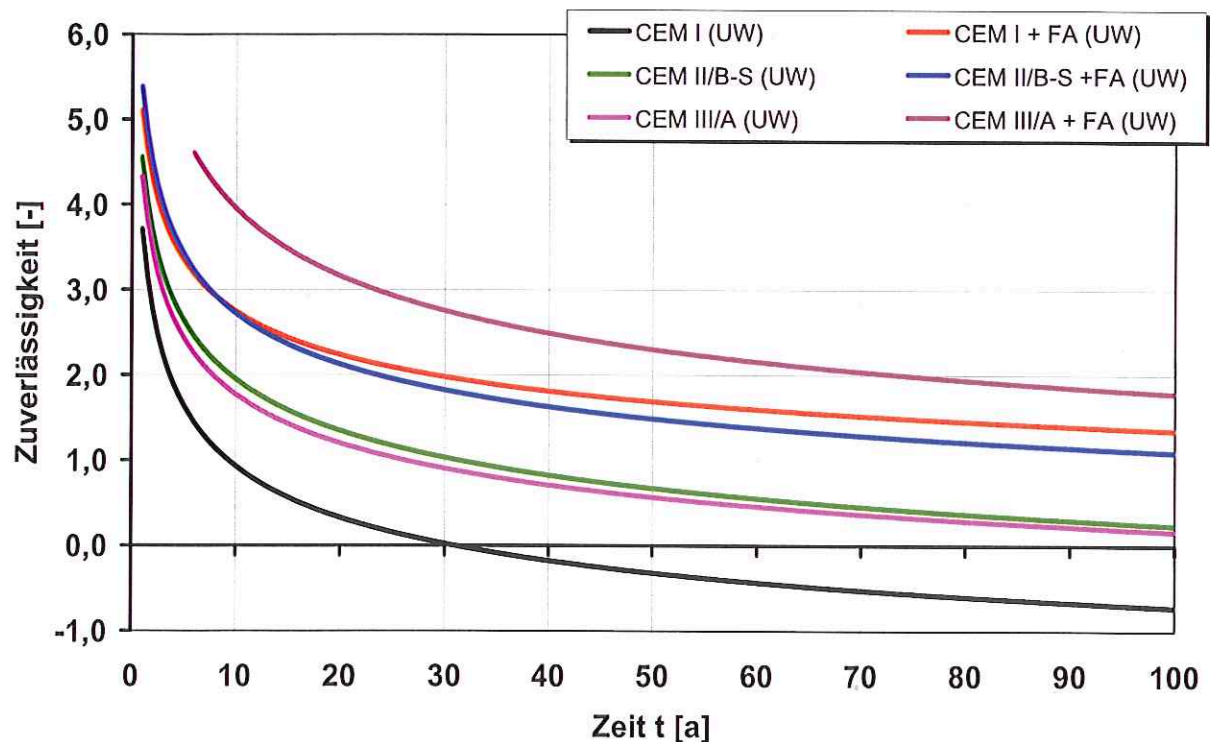


Bild 8: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für die sechs untersuchten Betone in der Unterwasserzone über 100 Jahre Lebensdauer ( $d_c = 60$  mm)

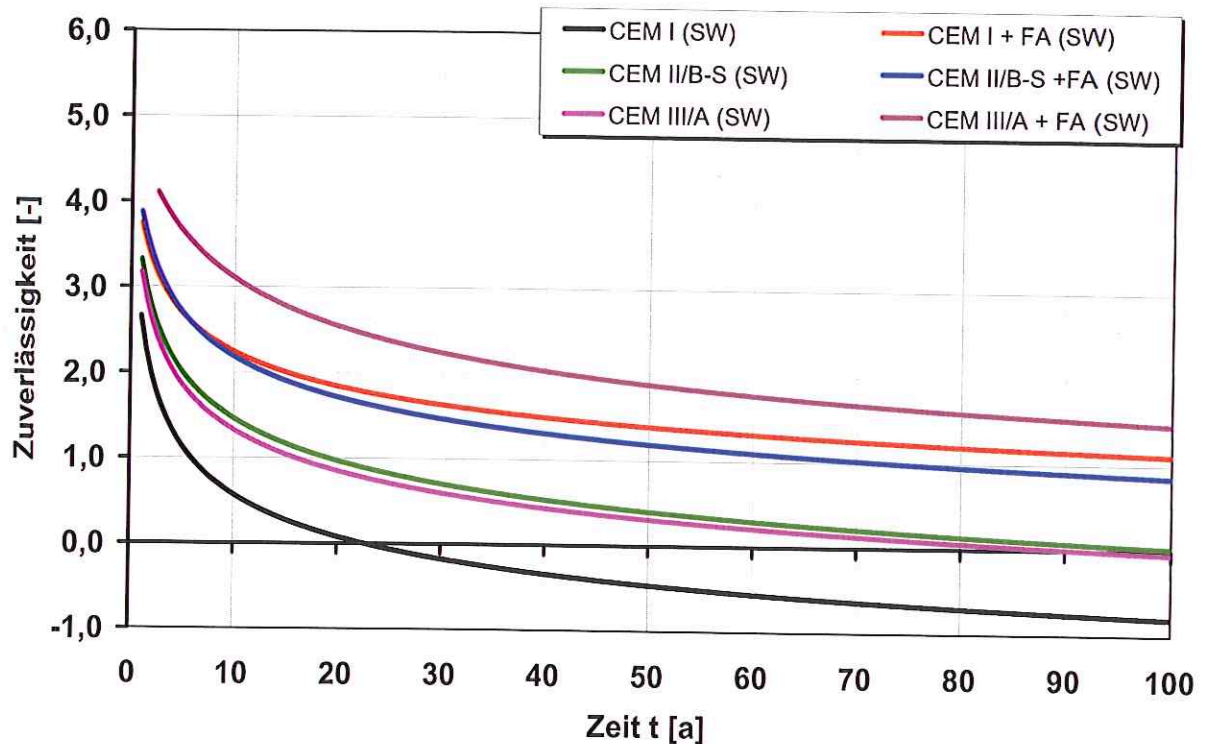


Bild 9: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für die sechs untersuchten Betone in der **Spritzwasserzone** über 100 Jahre Lebensdauer ( $d_c = 60 \text{ mm}$ )

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Zuverlässigkeit gegenüber dem Grenzzustand der Depassivierung infolge Chlorideindringens für alle Betone nicht signifikant unterschiedlich in Abhängigkeit der Expositionsbedingungen (Spritzwasser- und Unterwasserexposition) entwickeln. Hierfür sind eine für alle Berechnungen gleich angesetzte Betondeckung und der gleiche kritische Chloridgehalt verantwortlich. Die Zuverlässigkeiten für die Spritzwasserexposition sind jedoch geringfügig kleiner, wobei diese somit nicht zuletzt aufgrund der hier voll angesetzten Konvektionszone als pessimale Exposition identifiziert werden (XS3) kann. Daraus lässt sich folgern, dass die Ergebnisse einer Berechnung der Zuverlässigkeit für die Expositionsbedingung, wie sie sich in der Zone des Tidenhubs (vgl. Bild 4) einstellen werden, zwischen den hier dargestellten Ergebnissen von Spritzwasser- und Unterwasserzone liegen.

Die Ergebnisse für die erhöhte Betondeckung von ND(70 mm|6 mm) sind in Bild 10 und Bild 11 dargestellt.



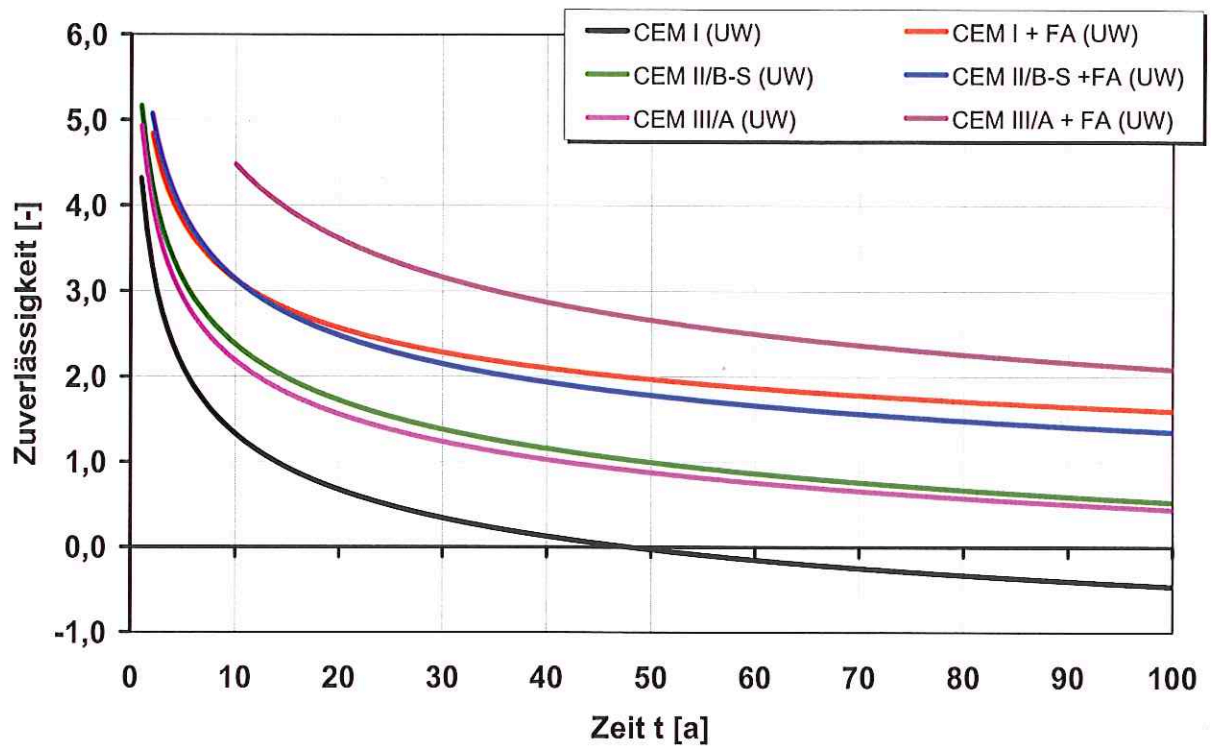


Bild 10: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für die sechs untersuchten Betone in der **Unterwasserzone** über 100 Jahre Lebensdauer ( $d_c = 70 \text{ mm}$ )

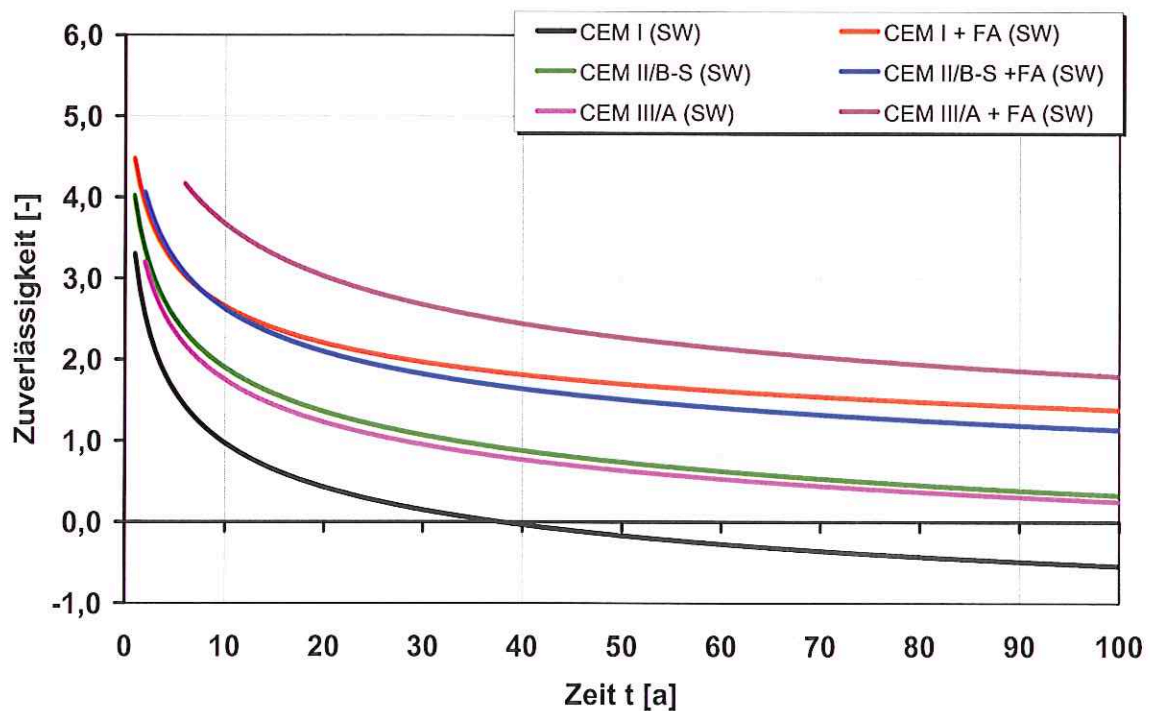


Bild 11: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für die sechs untersuchten Betone in der **Spritzwasserzone** über 100 Jahre Lebensdauer ( $d_c = 70 \text{ mm}$ )

### 3.3 Diskussion

Im Positionspapier des DAfStb [8] werden für leistungsbezogene Nachweise einer ausreichenden Dauerhaftigkeit der hier untersuchten Expositionsbedingungen (XS2, XS3) zum Ende der vereinbarten technischen Lebensdauer Zuverlässigkeiten angegeben. Diese sind unter ökonomischen und sicherheitsrelevanten Kriterien festgelegt worden. Für Meerwasserbauwerke, die nur schwer zugänglich sind, wird eine Zuverlässigkeit von  $\beta_0 = 1,5$  gefordert. Um die Ergebnisse von Kapitel 3.2 hinsichtlich dieser Anforderung zu prüfen, wurden die ungefähren Zeitpunkte, wann die Zuverlässigkeit von  $\beta_0 = 1,5$  etwa erreicht ist, in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der möglichen technischen Lebensdauer für die untersuchten Betone in Jahren bei  $\beta_0 = 1,5$

Beton/Bindemittel	mögliche technische Lebensdauer in Jahren			
	$d_{c,\mu} = 60 \text{ mm}$		$d_{c,\mu} = 70 \text{ mm}$	
	Unterwasser- zone	Spritzwasser- zone	Unterwasser- zone	Spritzwasser- zone
CEM I	$\approx 15$	$\approx 10$	$\approx 10$	$\approx 10$
CEM I mit Flugasche	$>50$	35-45	$>100$	$>50$
CEM II/B-S	20-30	$\approx 10$	20-30	10-20
CEM II/B-S mit Flugasche	$>50$	25-35	$>50$	45-55
CEM III/A	$\approx 25$	$\approx 10$	20-30	10-20
CEM III/A + Flugasche	$>100$	$>100$	$>100$	$>100$

Diese Ergebnisse zeigen, dass die Wahl des Bindemittels der ausschlaggebende Punkt eines leistungsbezogen Nachweisverfahrens gegenüber der Einleitungsphase der Bewehrungskorrosion ist. Nach den Berechnungsergebnissen erfüllen nicht alle Bindemittelarten die Anforderungen der Dauerhaftigkeiten hinsichtlich des leistungsbezogenen Nachweisverfahrens. Eine Erhöhung der Betondeckung um 10 mm ermöglicht jedoch einen größeren Spielraum für die Verwendung von Bindemittelkompositionen.

#### 4 Modellierung von Chloridprofilen

Für das Modellieren der Chloridprofile wurde Gleichung 4 und ein Großteil der Eingangsdaten, die bereits in Kapitel 3.1 dargestellt wurden, verwendet. Die Parameter, die davon abweichen, sind in Kapitel 4.1 aufgeführt.

Das Modellieren wurde nicht wie in Kapitel 3 zeitabhängig, sondern tiefenabhängig zum angeforderten Zeitpunkt durchgeführt. Dabei wurden die Mittelwerte analytisch modelliert und die 95%-Quantilwerte an Stützstellen des Chloridprofils numerisch [9] quantifiziert, z.B. Bild 12. Diese wurden dann ebenfalls in die Ergebnisse integriert. Der zum 95%-Quantil zugehörige Chloridgehalt wurde nach dem Prinzip von Gleichung 5 ermittelt.

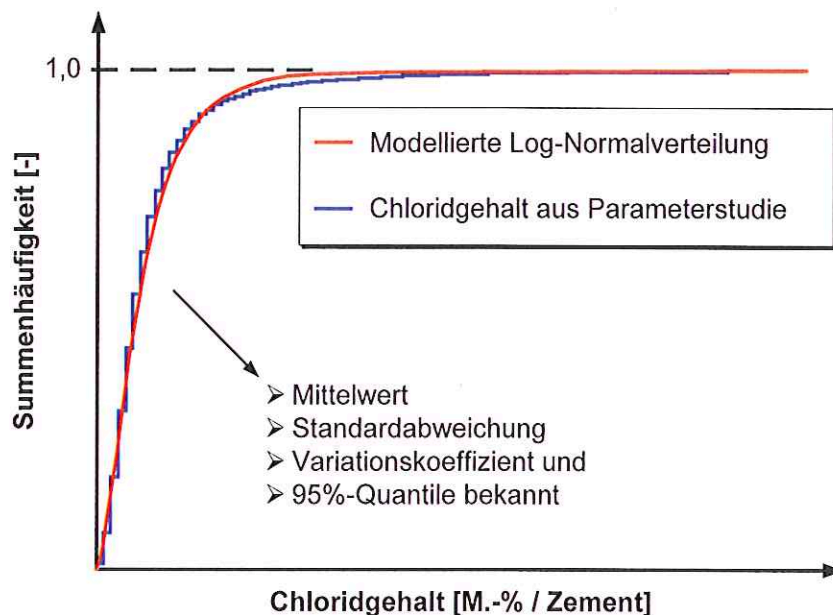


Bild 12: Schematische Darstellung der Quantifizierung eines Chloridgehalts mittels Parameterstudie

Die Chloridprofile wurden für die nachfolgenden Bauwerke (Bauteile) wie oben beschrieben ermittelt (Tabelle 7) und dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Im Anschluss daran wurden zwecks Validierung die Ergebnisse der Bohrmehlanalysen dieser Bauwerke, die vom Auftraggeber durchgeführt wurden, in die modellierten Chloridprofile eingefügt.



Tabelle 7: Überblick über die Bauteilinformationen für die Modellierung der Chloridprofile

Nr	Geografische Lage	Bauwerk	Lage in Bild 13 bis 15	Exposition Beschreibung	Klasse	Alter [a]		
1	Nordsee	Seeschleuse	1	Wasserwechsel- zone	XS3	60		
2						40		
3			unter Wasser	XS2	45			
4		Tönning	Eidersperrwerk	3	Wasserwechsel- zone	XS3	30	
5							40	
6	Spritzwasser/ Sprühnebel			XS3	30			
7	Ostsee	Eckernförde	Ostmole Marinearsenal	4	Spritzwasser/ Sprühnebel	XS3	40	
8							40	
9							40	
					5	Wasserwechsel- zone	XS3	6
								18
						6		
						18		



Bild 13: Satellitenfoto der Seeschleuse, Wilhelmshaven. Quelle: Google Earth



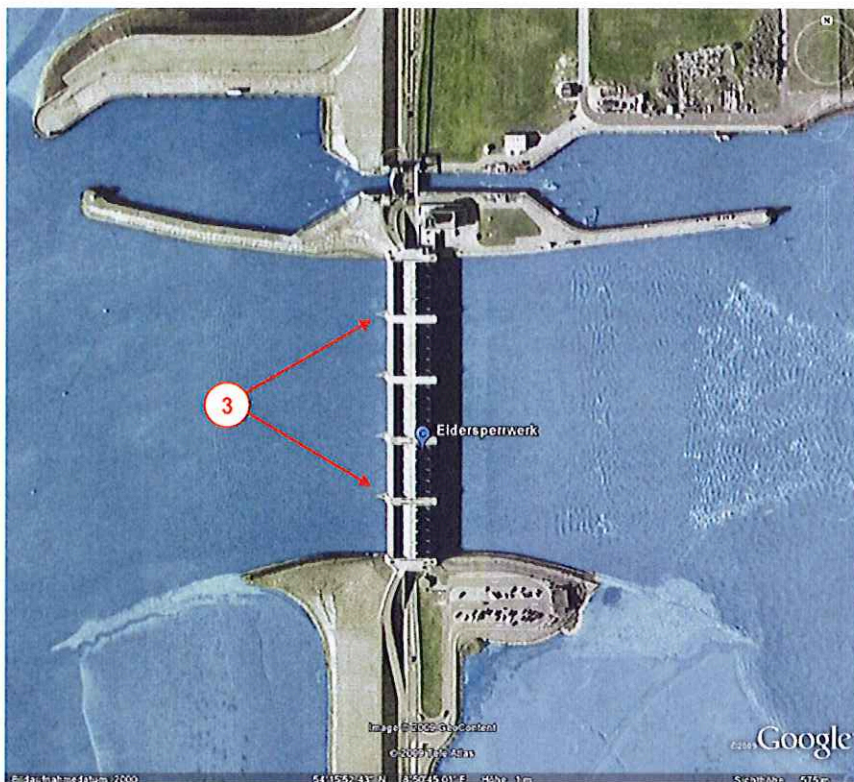


Bild 14: Satellitenfoto des Eidersperrwerks, Tönning. Quelle: Google Earth

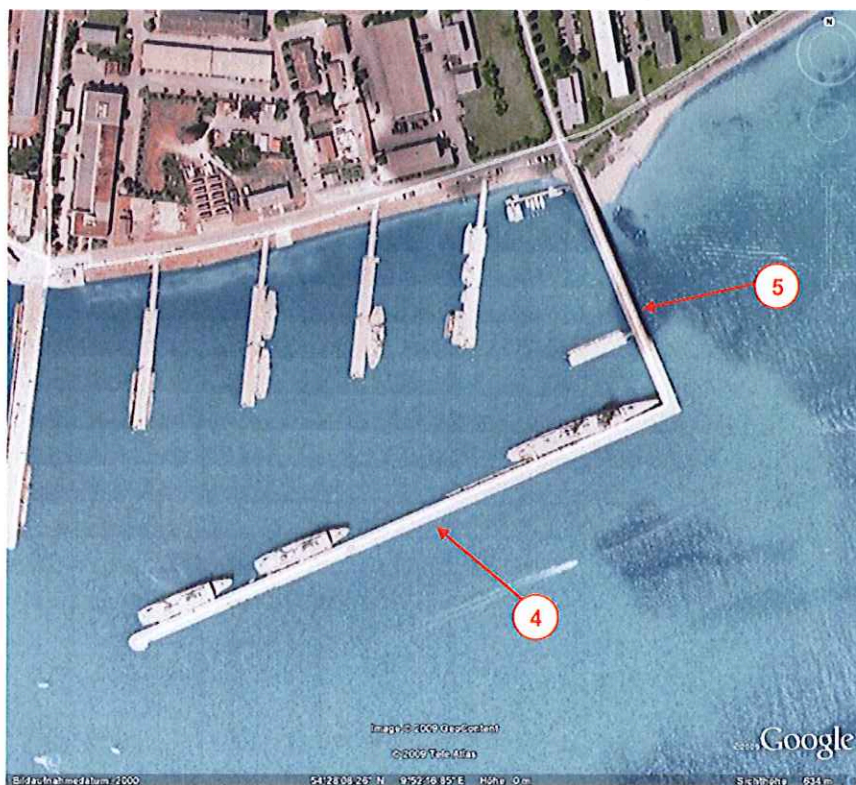


Bild 15: Satellitenfoto der Ostmole des Marinearsenals, Eckernförde. Quelle: Google Earth



Die Betonzusammensetzungen und Betonalter der Bauteile in Tabelle 7 sind zusammen mit den mittleren Temperaturen und der Standardabweichung für die zugehörigen Orte in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8: Zusammensetzung der Betone der in Tabelle 7 aufgeführten Bauteile

Nr.	Betonzusammensetzung						Temperatur [19]	
	Zement [-]	z [kg/m³]	Zusatzstoff [-]	f [kg/m³]	w/z [-]	g [kg/m³]	$\mu$ [°C]	$\sigma$ [°C]
1	HOZ 225	300	Trass	60	k.A.	1800	8,1	5,8
2	HOZ 275	295	Trass	30	0,55-0,60	1828	8,1	5,8
3	HOZ 275	295	Trass	30	0,55-0,60	1828	8,1	5,8
4	HOZ 275	320	Trass	30	0,50	1862	8,5 <sup>1)</sup>	6,0 <sup>1)</sup>
5	PZ 375	375	Trass	20	0,45	1805	8,5 <sup>1)</sup>	6,0 <sup>1)</sup>
6	HOZ 275	300	Trass	35	k.A.	k.A.	8,5 <sup>2)</sup>	6,0 <sup>2)</sup>
7	HOZ 275	350	Trass	20	k.A.	k.A.	8,5 <sup>2)</sup>	6,0 <sup>2)</sup>
8	PZ 45 L NA	350	-	-	0,47	1769	8,5 <sup>2)</sup>	6,0 <sup>2)</sup>
9	HOZ 35 L NW	350	-	-	0,47	1769	8,5 <sup>2)</sup>	6,0 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>: Wetterdaten für den nächstgelegenen Ort (Sankt Peter-Ording, 14 km Entfernung)

<sup>2)</sup>: Wetterdaten für den nächstgelegenen Ort (Kiel Holtenau, 21 km Entfernung)

#### 4.1 Eingabewerte

Da sich die Expositionsbedingungen und die Betonzusammensetzungen von denen in Kapitel 3 unterscheiden, sind die nachfolgenden Parameter abweichend dazu angesetzt worden.

- Der (Ersatz-)Oberflächenchloridgehalt  $C_{s,\Delta x}$  wurde auf Grundlage der in den vorigen Kapiteln dargestellten Zusammenhänge für die Betone geschätzt und nach Tang [13] nachvollzogen. Die Meerwasserchloridkonzentration wurde für die Nordsee zu 20 g/l und für die Ostsee zu 9 g/l angesetzt.
- Die zuvor getroffenen Annahmen haben entsprechend auch einen Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizient  $D_{RCM,0}$  und den Alterungsexponenten  $a$ , die für die Betone angesetzt wurden.
- Die Konvektionszone  $\Delta x$  wurde lediglich für die Spritzwasserexposition angesetzt.

Für die Bauteile 1 bis 7 wurden Betone mit Trass verwendet. Trass ist ein puzzolanisches Gestein/Bindemittel, weshalb seine Wirksamkeit bei den Annahmen für  $D_{RCM,0}$ ,  $a$ , und  $C_{s,\Delta x}$  berücksichtigt wurde. Hierbei ist allerdings nicht von einer gleich starken Wirksamkeit wie die heutiger Flugaschen ausgegangen worden. Die Begründung hierfür ist das Alter der Bauteile und die daraus resultierende Qualität bei der Herstellung/Gewinnung des Trass.

Die nachfolgenden Tabellen fassen die zum vorangegangenen Kapitel abweichenden Eingangsparameter zusammen.

Tabelle 9: (Ersatz-)Oberflächenkonzentration  $C_{S,\Delta x}$  und Konvektionszone  $\Delta x$

Nr.	Typ	$C_{S,\Delta x}$ [M.-%/zem]			Quelle	Tiefe der Konvektionszone $\Delta x$
		m	s	v		
1	LND	3,80	1,71	45%	↑	-
2	LND	3,60	1,62	45%	Schätzung nach [12] und [13]	-
3	LND	3,60	0,90	25%		-
4	LND	3,60	1,62	45%		-
5	LND	2,60	1,17	45%		vgl. Tabelle 5
6	LND	1,62	0,73	45%		vgl. Tabelle 5
7	LND	1,60	0,72	45%		vgl. Tabelle 5
8	LND	1,13	0,51	45%		-
9	LND	1,58	0,71	45%	↓	-

Tabelle 10: Chloridmigrationskoeffizient  $D_{RCM,0}$  und Alterungsexponent  $a$

Nr.	Typ	$D_{RCM,0}$ bei $t_0=28d$ [m <sup>2</sup> /s]			Quelle	Typ	Alterungsexponent $a$ [-]					Quelle
		$\mu$	$\sigma$	v			m	s	a	b	v	
1	ND	5,75	1,73	30%	↑ Schätzung nach [12]	Beta	0,45	0,14	0,00	1,00	31%	↑ Schätzung nach [12]
2	ND	7,50	2,78	37%		Beta	0,43	0,13	0,00	1,00	30%	
3	ND	7,50	2,78	37%		Beta	0,43	0,13	0,00	1,00	30%	
4	ND	7,25	2,68	37%		Beta	0,43	0,13	0,00	1,00	30%	
5	ND	11,00	5,50	50%		Beta	0,40	0,12	0,00	1,00	30%	
6	ND	7,50	2,78	37%		Beta	0,43	0,13	0,00	1,00	30%	
7	ND	7,00	2,45	35%		Beta	0,42	0,13	0,00	1,00	31%	
8	ND	13,00	6,50	50%	↓ Schätzung nach [12]	Beta	0,30	0,12	0,00	1,00	40%	↓ Schätzung nach [12]
9	ND	1,90	0,76	40%		Beta	0,45	0,20	0,00	1,00	44%	

## 4.2 Ergebnisse

Die nachfolgenden Diagramme (Bild 16 bis Bild 28) zeigen die modellierten Chloridprofile. Die Diagramme stellen neben dem Mittelwert ebenfalls die 95% Quantilwerte dar. In der Tiefe von



0 mm sind die 5% und 95%-Quantilwerte der Oberflächen- bzw. Ersatzoberflächenkonzentration (diese gilt in der Regel bis zu einer Tiefe von 8,9 mm) dargestellt.

Die Chloridprofile werden generell in zwei Bereiche unterteilt: (a) Zum Einen der Bereich in einer Tiefenlage  $> 10$  mm und (b) zum Anderen der Bereich zwischen Oberfläche und 10 mm Tiefe.

Bei (a) wird davon ausgegangen, dass die Chloridprofile mit 95%iger Wahrscheinlichkeit innerhalb der schraffierten Fläche liegen. Der Anspruch ist es, die tatsächlichen Chloridgehalte aus den Bauteilen im Bereich der modellierten Mittelwerte wiederzufinden (gestrichelte schwarze Line)

Im Fall (b) ist die Vorhersage der Mittelwerte nicht verlässlich, da in diesem Bereich eine große Beeinflussung durch verschiedene Chloridtransportvorgänge vorherrscht.

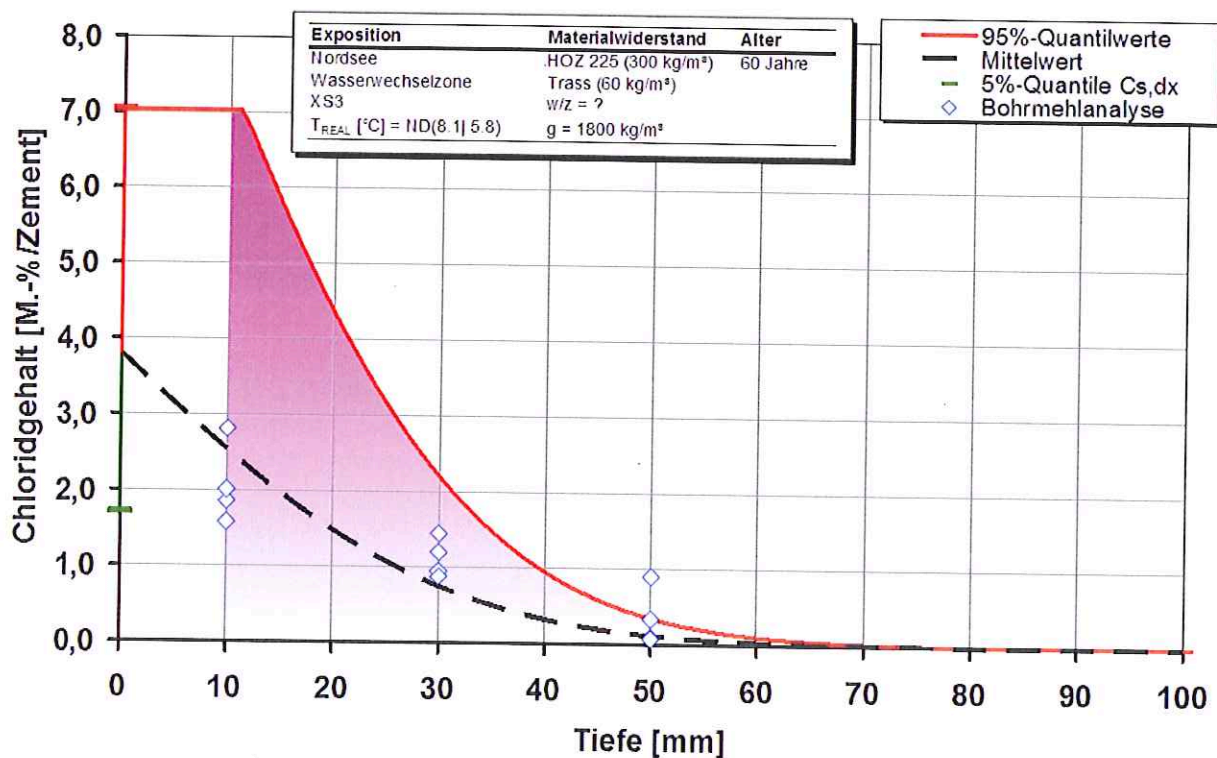


Bild 16: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 1** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse



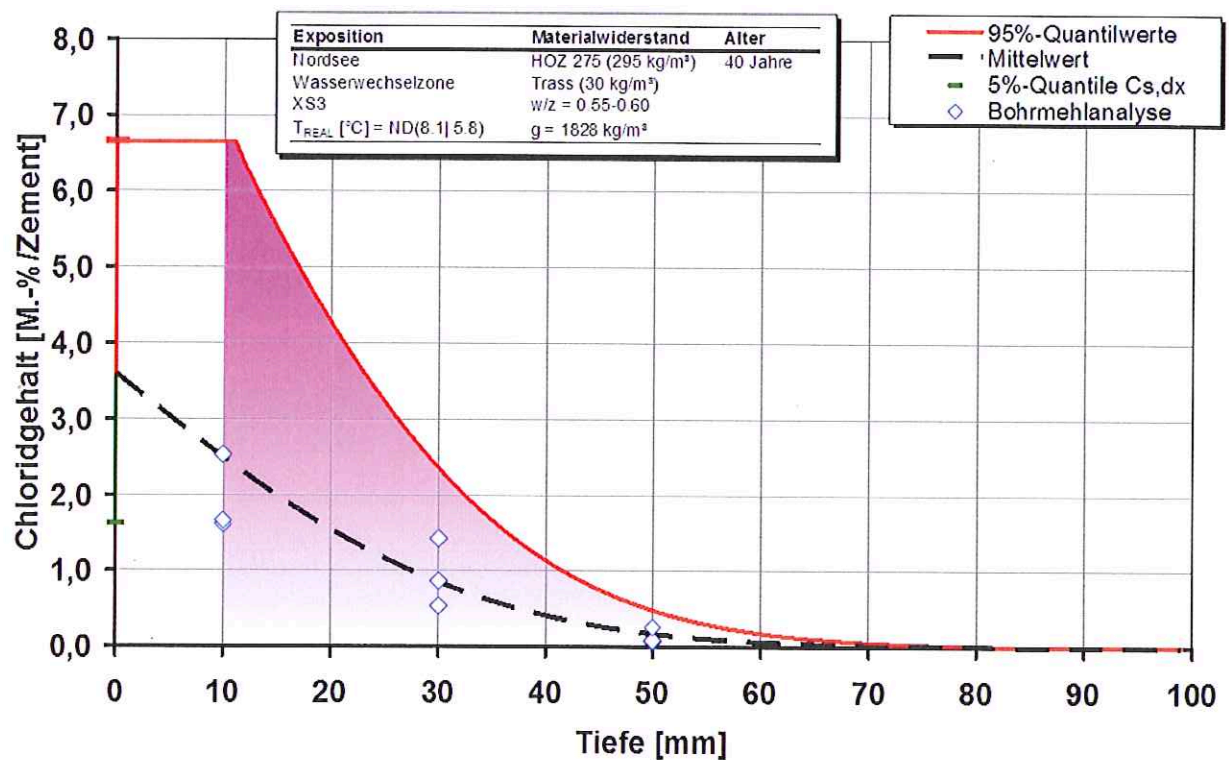


Bild 17: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 2** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

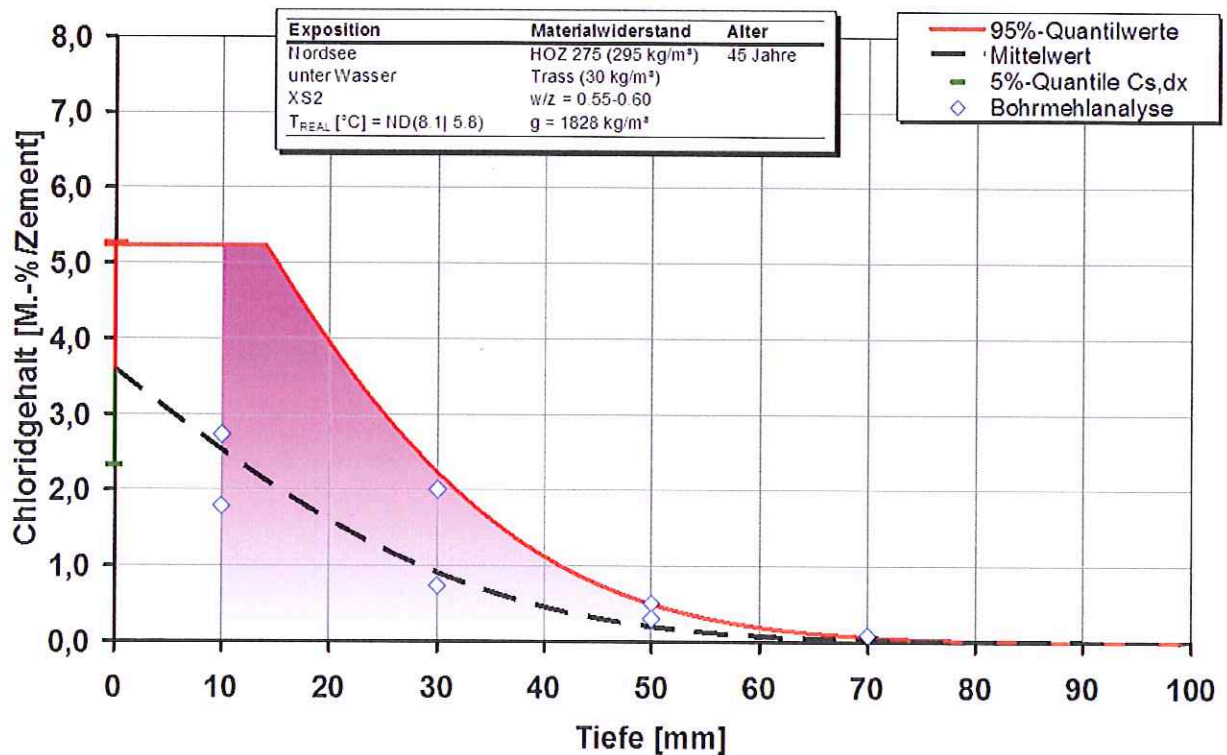


Bild 18: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 3** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

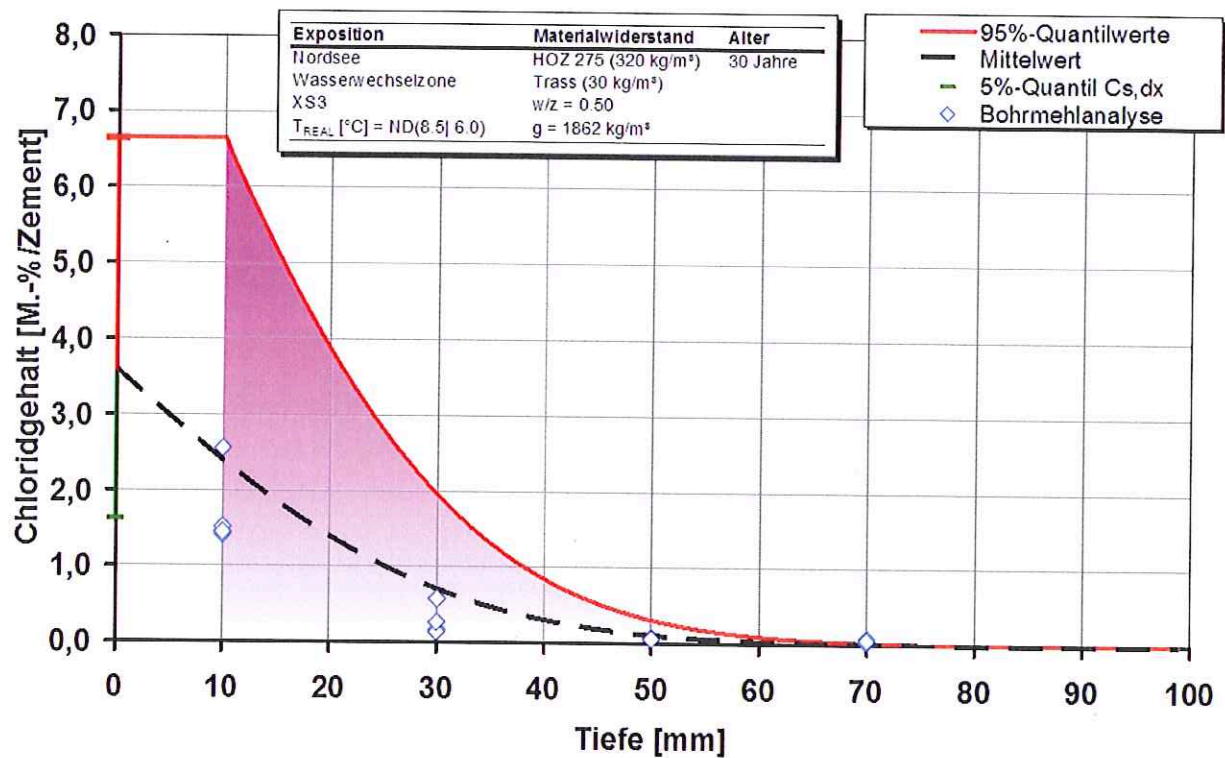


Bild 19: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 4** im Alter von **30 Jahren** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

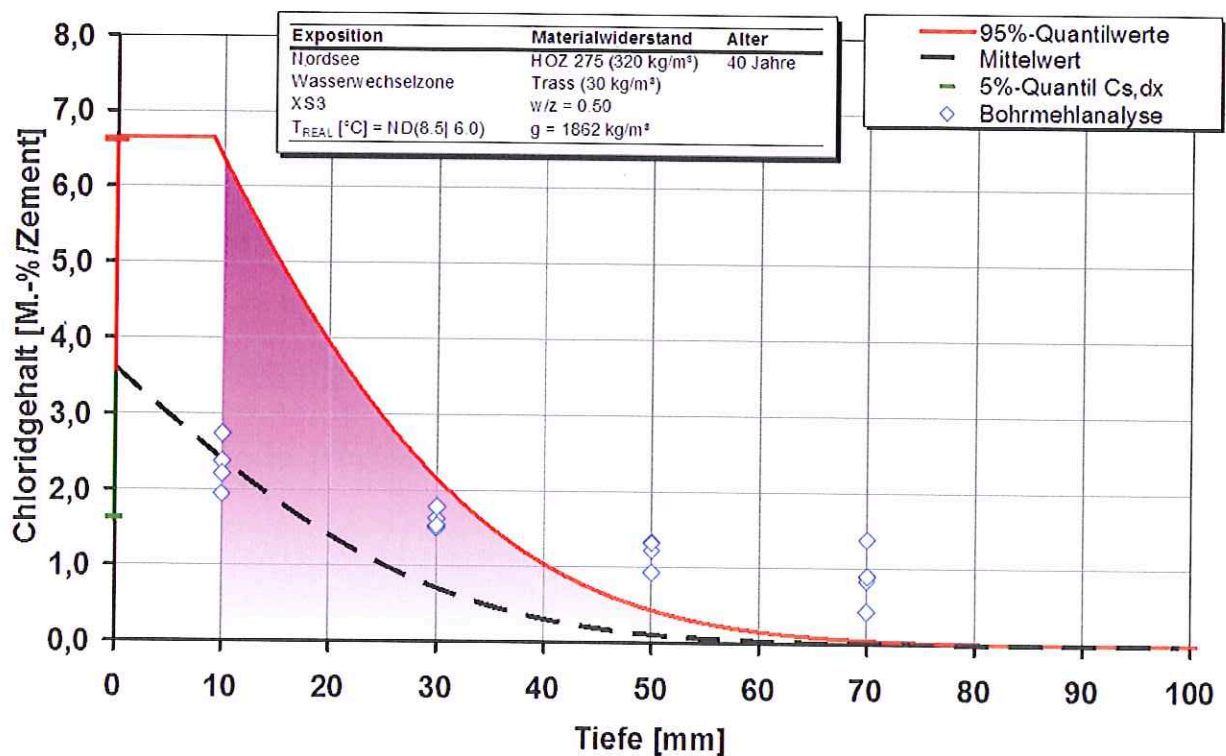


Bild 20: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 4** im Alter von **40 Jahren** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

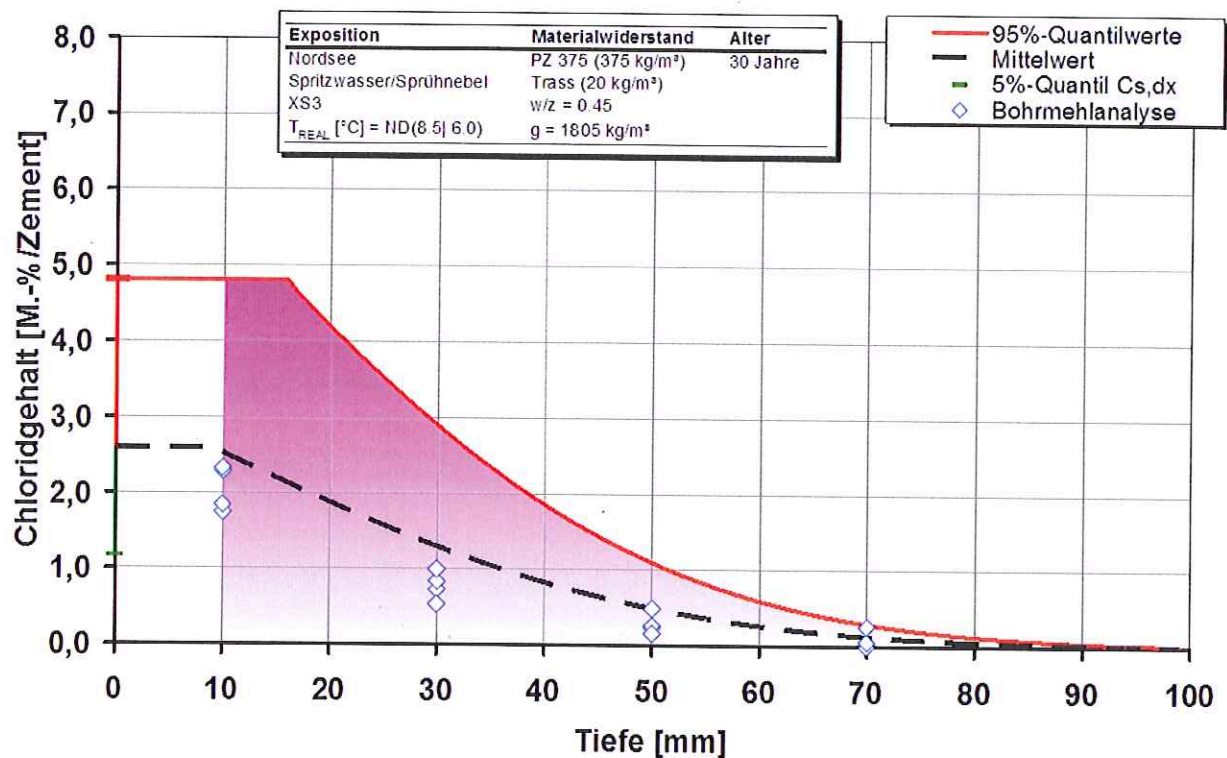


Bild 21: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte Bauteil Nr. 5 im Alter von 30 Jahren mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

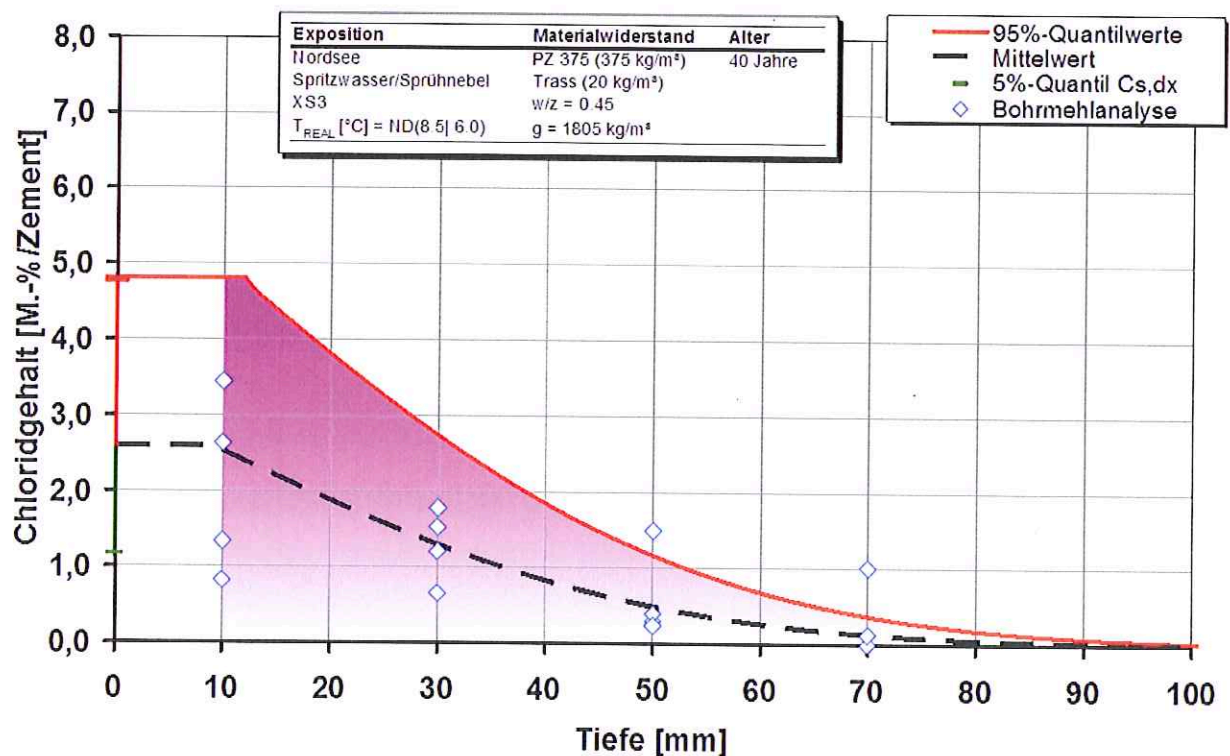


Bild 22: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte Bauteil Nr. 5 im Alter von 40 Jahren mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse



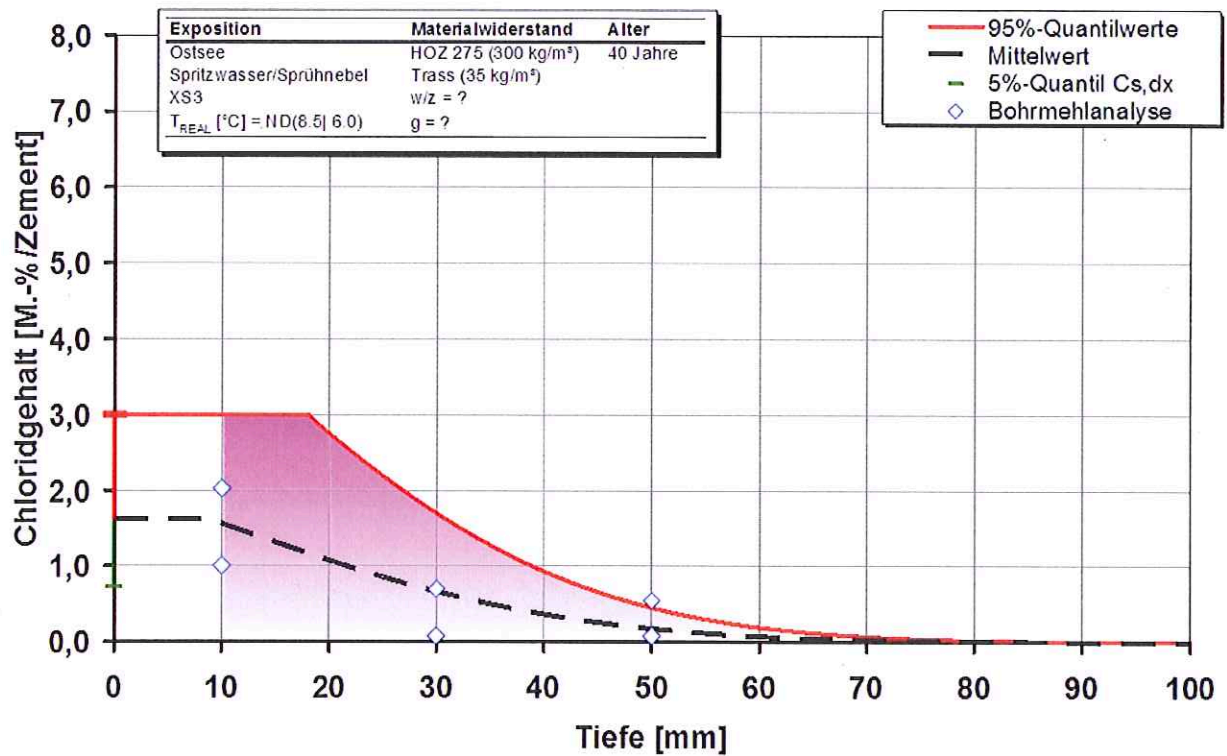


Bild 23: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 6** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

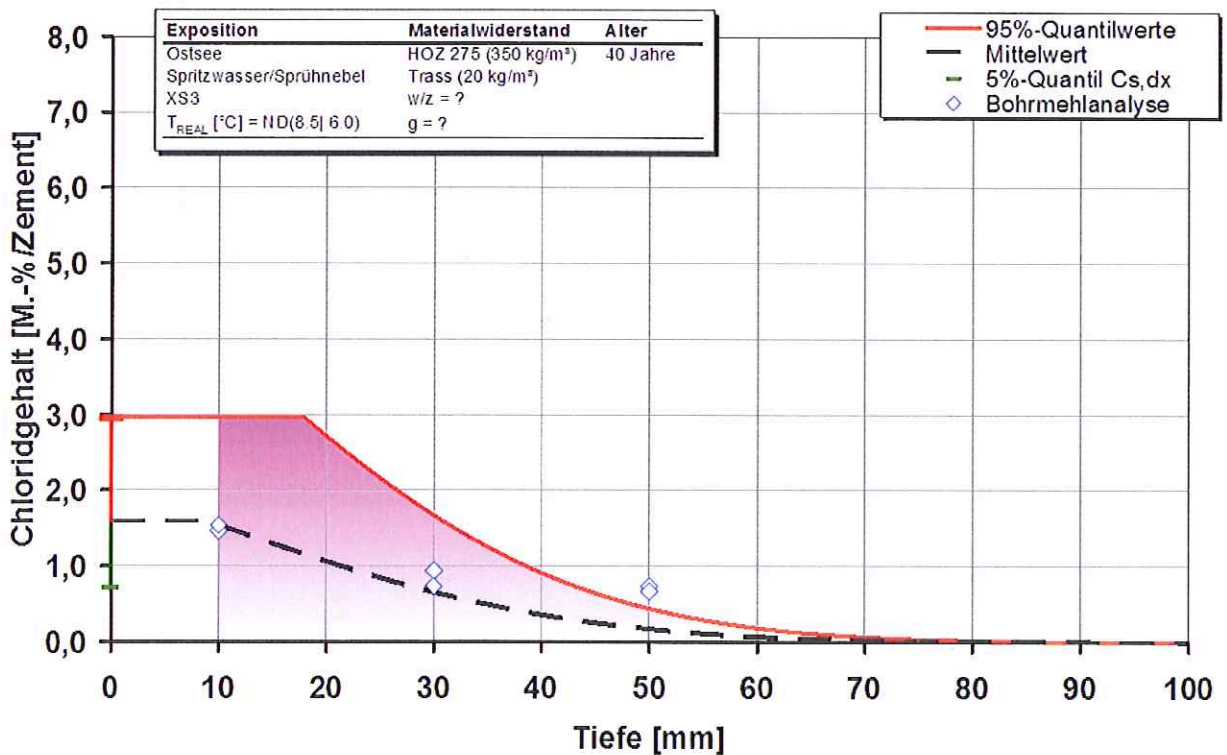


Bild 24: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 7** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

CL\_08J06

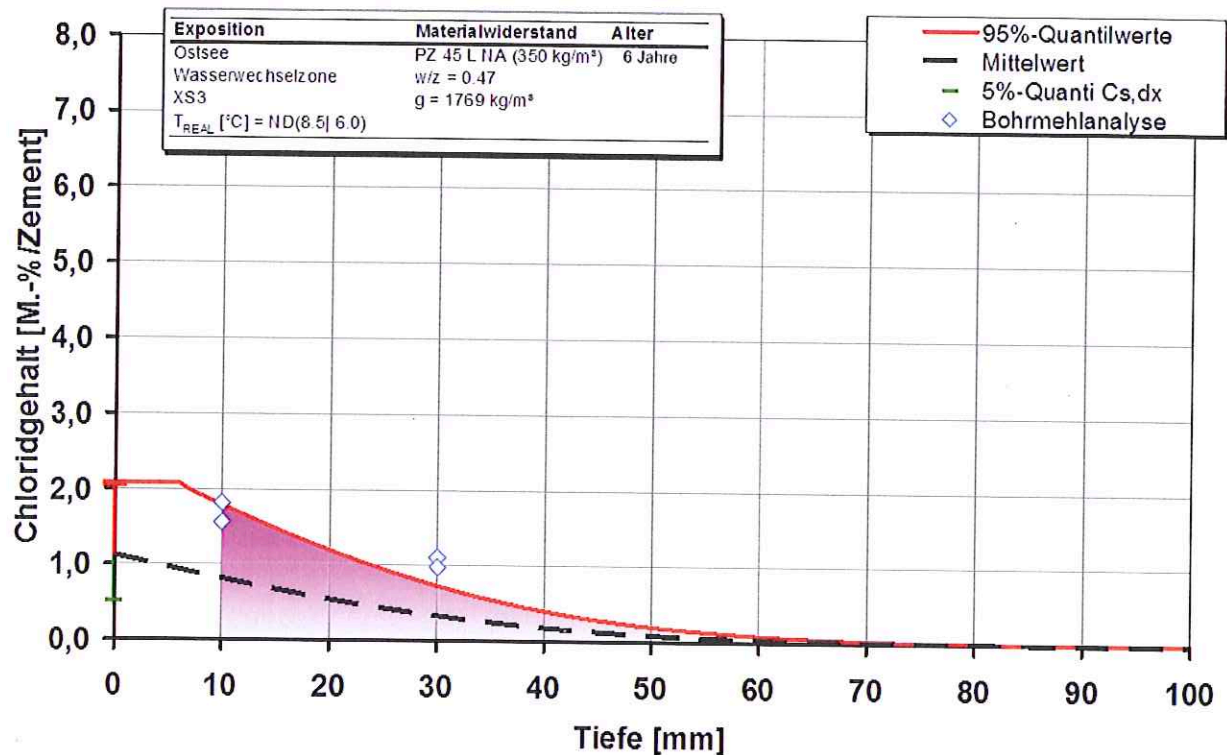


Bild 25: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte Bauteil Nr. 8 im Alter von 6 Jahren mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

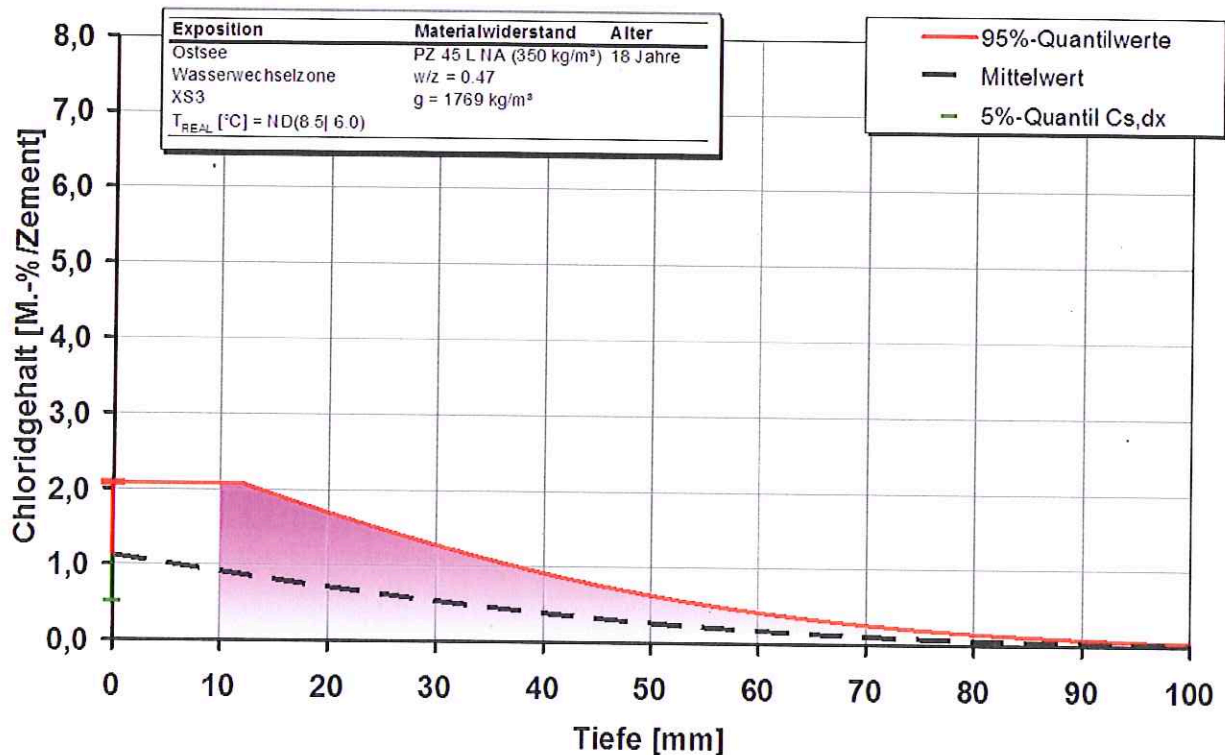


Bild 26: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte Bauteil Nr. 8 im Alter von 18 Jahren

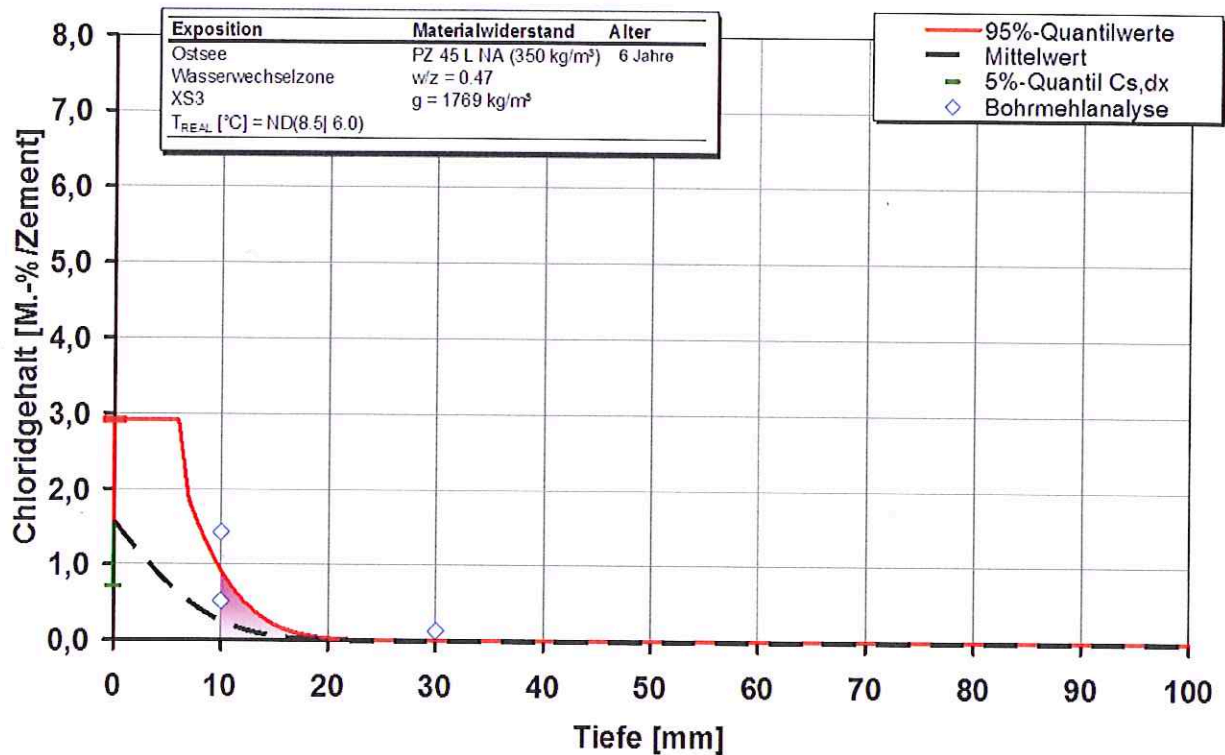


Bild 27: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 9** im Alter von **6 Jahren** mit Ergebnissen der Bohrmehlanalyse

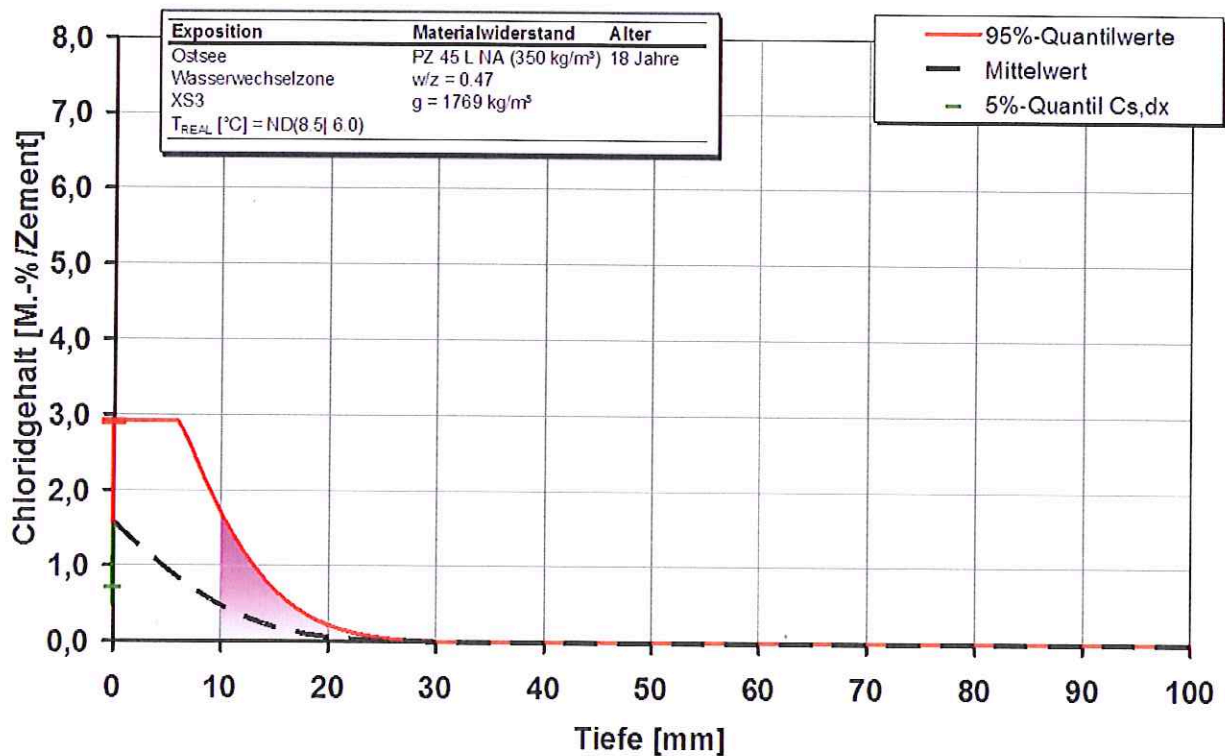


Bild 28: Modelliertes Chloridprofil für das angeforderte **Bauteil Nr. 9** im Alter von **18 Jahren**



Die Ergebnisse zeigen, dass generell eine gute Übereinstimmung der modellierten Chloridgehalte mit den Bohrmehlanalysen für die Nordseebauteile besteht. Eine Ausnahme bilden die in den Tiefen von 50 und 70 mm bestimmten Chloridgehalte von Bauteil 4 nach 40 Jahren (Bild 20). Für drei der vier untersuchten Ostseebauteile (Bauteile 7 bis 9) unterschätzen die modellierten Chloridprofile die Ergebnisse der Bohrmehlanalysen. Im Folgenden werden die möglichen Ursachen hierfür diskutiert.

### 4.3 Diskussion

Die Annahmen für die Eingangswerte der Modellierung bilden die reale Bauteilsituation recht gut ab. Ausnahme hier ist das Chloridprofil von Bauteil Nr. 4 im Alter von 40 Jahren. Die zum früheren Zeitpunkt bestimmten Chloridgehalte (Bild 19, zehn Jahre früher) zeigen signifikant niedrigere Werte. Da in einer derart kurzen Zeitperiode kein so großes Eindringen von Chloriden durch ein intaktes Betongefüge möglich ist, wird davon ausgegangen, dass die Bohrmehlproben aus einem geschädigten (gerissenen) Bereich entnommen wurden. Dafür spricht auch der sehr niedrige Konzentrationsgradient in Bild 20, der typisch für Analysen aus Rissbereichen ist.

Die Differenz von Chloridgehalten aus den Bohrmehlanalysen zu den modellierten Chloridgehalten der Bauteile 7 bis 9 kann an einer zu gering angesetzten (Ersatz-)Oberflächenchloridkonzentration liegen, da für diese Bauteile generell eher zu geringe Chloridgehalte prognostiziert wurden. Hierfür könnte ein höherer Chloridgehalt als 9 g/l, der für die Ostsee angesetzt wurde, verantwortlich sein.

In Bauteil 7 passt zwar die Ersatzoberflächenkonzentration sehr gut, mit zunehmender Tiefe aber weichen die prognostizierten Konzentrationen von den tatsächlichen ab. Hierfür könnte ähnlich wie bei Bauteil Nr. 4 (im Alter von 40 Jahren) auch eine Schädigung des Betongefüges verantwortlich sein. Des Weiteren waren keine Informationen bezüglich des w/z-Werts vorhanden. Für die Berechnung wurde ein Materialwiderstand angesetzt, der für Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 zu erwarten ist. Womöglich ist der Beton aber auch mit einem anderen w/z-Wert eingebaut worden.

Für die Bauteile 8 und 9 ist aufgrund des recht jungen Alters eine zutreffende Berechnung relativ schwierig. Eine Validierung der modellierten Chloridprofile ist daher nur mit Einschränkungen möglich. Die Konzentrationsgradienten stimmen zwar ganz gut überein, die Oberflächenkonzentrationen wurden aber offensichtlich zu niedrig abgeschätzt. Insofern wird empfohlen, die Annahme zur Chloridkonzentration der Ostsee an den Stellen noch einmal zu überprüfen.

## 5 Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden zwei Aufgaben bearbeitet:

1. Für sechs Betone wurden die **Zuverlässigkeiten** hinsichtlich der chloridinduzierten Depassivierung der Bewehrung über einen Zeitraum von 100 Jahren ermittelt (Kapitel 3).
2. Für insgesamt neun Stahlbetonbauteile, die vom Auftraggeber anhand von Expositionsbedingungen und Betonzusammensetzungen spezifiziert wurden, wurden **tiefenabhängige Chloridgehalte** berechnet (Kapitel 4).

(1) Hier wurden mit bestimmten Rezepturen erzielte **Zuverlässigkeiten** mit im Positionspapier des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton geforderten Sicherheitsniveaus verglichen.

Der Einfluss der Bindemittelart ist als dominanter Faktor identifiziert worden. Hierbei muss insbesondere die Verwendung von reinem Portlandzementbeton für die untersuchten Expositionen (XS2, XS3) ausgeschlossen werden. Die größten Eindringwiderstände lieferte der Hochofenzementbeton mit Flugasche.

Unter Berücksichtigung einer Erhöhung der Betondeckung um 10 mm erscheint der Einsatz von Bindemitteln (CEM I, CEM II/B-S und CEM III/A) mit Flugasche sinnvoll, auch zur Erzielung von Lebensdauern in der Größenordnung von rund 100 Jahren.

(2) Bei der Berechnung der **tiefenabhängigen Chloridgehalte** konnte eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Chloridgehalten aus Bohrmehlanalysen der Nordseebauteile und für Bauteile, die 30 Jahre und älter sind, erzielt werden. Differenzen wurden lediglich für vier Bauteile festgestellt. Davon waren bei zwei Bauteilen (Bauteil 4 und Bauteil 7) die Ergebnisse der Bohrmehlanalysen fragwürdig (mögliche Schädigung im Betongefüge, Beprobung im Rissbereich denkbar). Für die übrigen Ostseebauteile (Bauteil 8 und Bauteil 9) wurden die Chloridgehalte möglicherweise auf Grundlage zu geringer Oberflächenchloridkonzentrationen berechnet. Für eine weitere Validierung können die realen Meerwasserchloridgehalte oder die tatsächlichen Schnellchloridmigrationskoeffizienten  $D_{RCM,0}$  in Versuchen ermittelt werden.



## LITERATUR

- [1] DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1, Beuth Verlag, Berlin, August 2008.
- [2] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Lesungsbereich 215), Ausgabe 2004.
- [3] Änderungen zu den ZTV-W LB 215, Dezember 2008.
- [4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Lesungsbereich 219), Ausgabe 2004.
- [5] Änderungen zu den ZTV-W LB 219, Dezember 2008.
- [6] Schießl, P. et al.: Model Code for Service Life Design. fib bulletin N0. 34, Februar 2006.
- [7] DIN-Fachbericht 100: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2. Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [8] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Positionspapier zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, pp. 837-839.
- [9] STRUREL – A structural reliability analysis program-system. Reliability Consulting Programs, <http://www.strurel.de>.
- [10] Tuutti, K.: Corrosion of Steel in Concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute. In: CBI Research, No. Fo 4:82, 1982.
- [11] Webseite der DFG-Forschergruppe 537: Modellieren von Bewehrungskorrosion. <http://for537.cbm.bv.tum.de>.
- [12] Gehlen, Ch.: Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken - Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. DAfStb Heft 510, Beuth Verlag, Berlin, Dezember 2000.
- [13] Tang, L.: Chloride transport in concrete – Measurement and prediction. Dissertation, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden, Veröffentlichung P-96:6, 1996.
- [14] Verein Deutscher Zementwerke e.V., <http://www.vdz-online.de>.
- [15] Lay, S.: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 568, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [16] DIN 1045-1:2008: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Beuth Verlag, Berlin, 2008.

- [17] ZTV-W:2004: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau. LB 215: Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton, 2004.
- [18] DBV-Merkblatt Betondeckung und Bewehrung. Deutscher Beton-Verein e.V. – dbv, Berlin, Fassung 1997.
- [19] Onlineangebot des Deutschen Wetterdienstes: <http://www.dwd.de>, September 2009.